

Accélérateurs de particules une introduction

Jean-Marie De Conto
Université Grenoble Alpes
LPSC - Grenoble

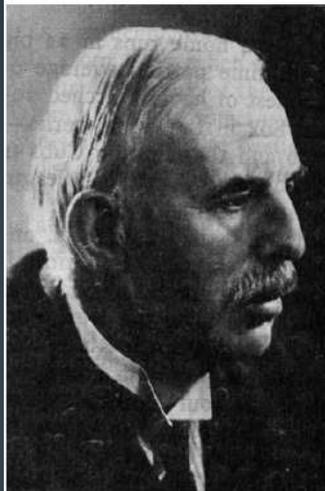
Des accélérateurs de particules vus de l'utilisation

- Machines électrostatiques (ex: spectrométrie de masse, irradiation): CSNSM, Bordeaux, Grenoble
- Des machines à ions pour la physique nucléaire
 - Cyclotrons du GANIL
 - Linac de SPIRAL2: énergie modérée, fort courant, forte puissance ($P=EI$)
- Des machines à électrons
 - Collisionneurs très haute énergie (LEP), physique des particules
 - Machines à rayonnement synchrotron (SOLEIL, ESRF)
- Des linacs protons très forte puissance
 - ESS, IFMIF (irradiation), MYRRHA (réacteurs pilotés par accélérateurs)
- Des machines médicales (cyclotron CPO, synchrotron CNAO)
- Des collisionneurs à ions ou protons (LHC)
- Des tas de machines (ThomX, ELI....)

Les accélérateurs de particules vus par le concepteur

- Une source de particules chargées: électrons, ions ,protons...
- Des éléments d'accélération
 - un tube accélérateur (machine électrostatique)
 - des cavités haute fréquence (100MHz-3GHz), chaudes ou supraconductrices
- Des éléments de guidage
 - des lentilles de focalition (électrostatiques, quadripôles électriques ou magnétiques)
 - des éléments de courbure (déflecteurs électrostatiques, dipôles magnétiques)
- Des diagnostics de faisceau
 - mesures de courant, de position, d'emittance, et l'électronique associée
- Des "infrastructures"
 - système de vide plus ou moins poussé, mais toujours très propre
 - des amplificateurs haute fréquence pour apporter l'énergie dans les cavités
 - un système cryogénique pour les éléments supraconducteurs
- Des utilisateurs
- Un faisceau est caractérisé par différentes grandeurs
 - sa structure en temps
 - son intensité (instantanée et moyenne –puissance-) et cycle utile
 - son emittance (taille*divergence) qui est une quantité qui se conserve

Comment être précurseur: s'appeler Ernest

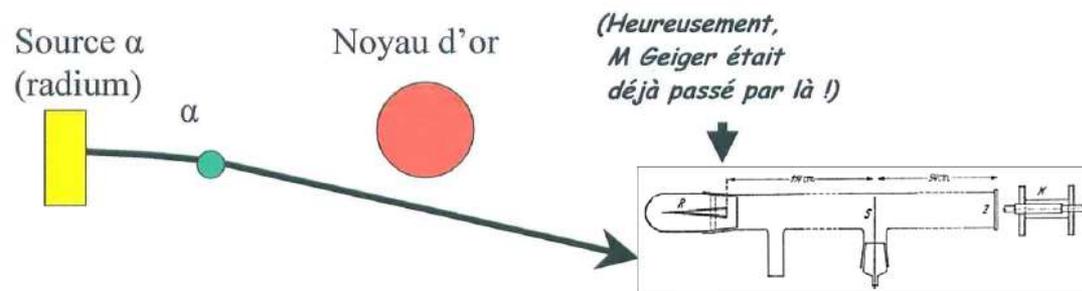


Ernest Rutherford,

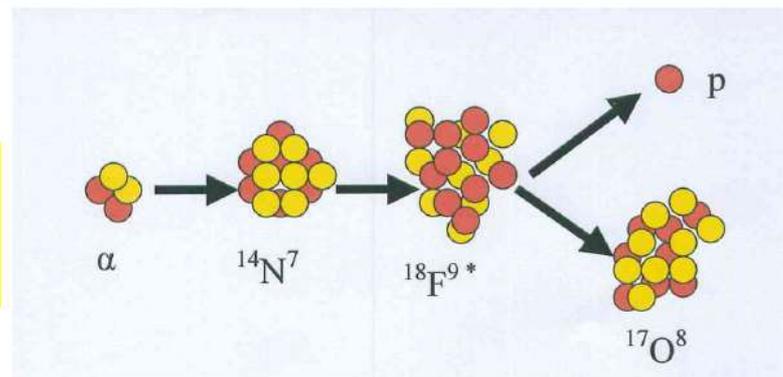
1st baron of Nelson and Cambridge, et fervent de rugby

...et il veut des projectiles encore plus énergiques ! (1927)

Il met en évidence l'existence d'un noyau dans l'atome (1911)

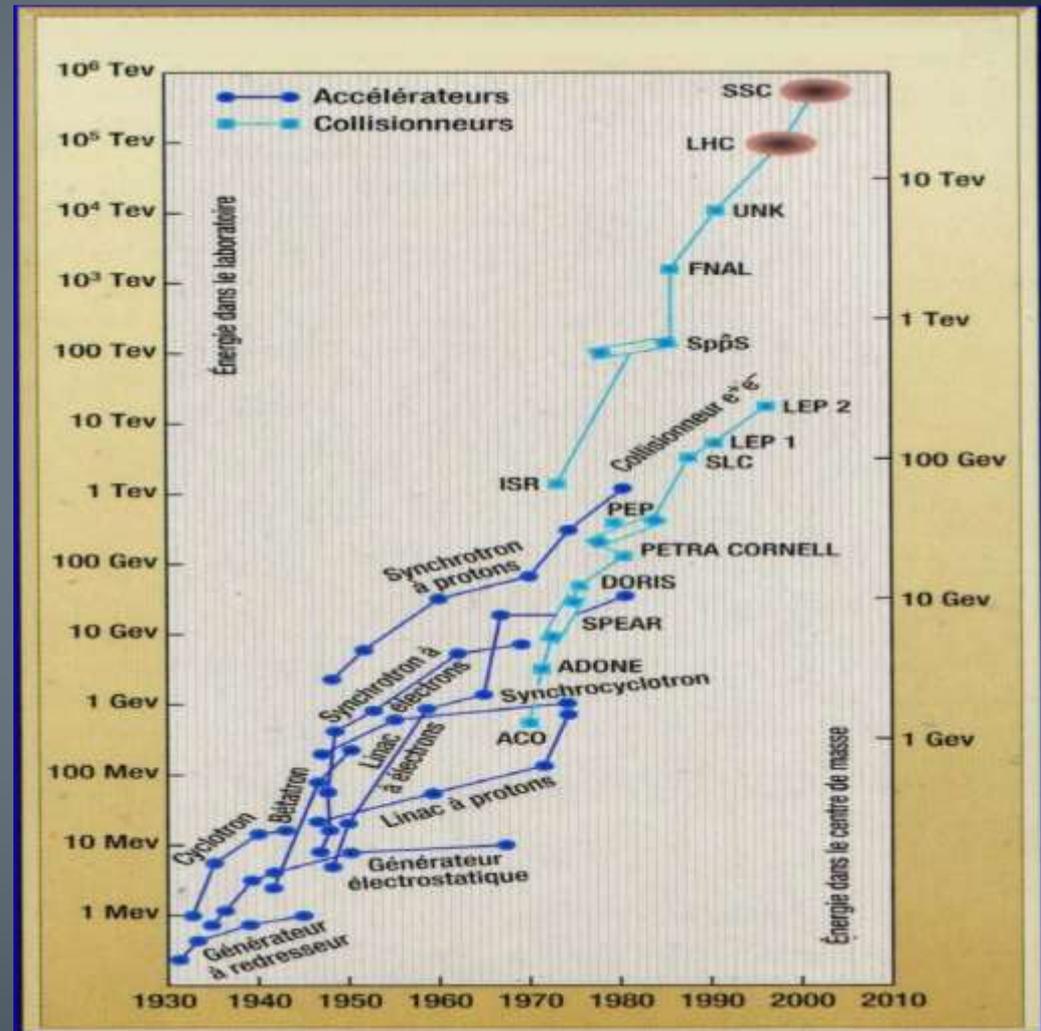


Il réussit la première transmutation artificielle (1919) avec un projectile rapide : l' α , issu d'une source radioactive.



Le diagramme de Livingston

- Note: SSC (Supercollisionneur supraconducteur, ex-concurrent du LHC, abandonné)
- Il manque FCC et ILC ou CLIC)
- Paramètre nouveau: le courant



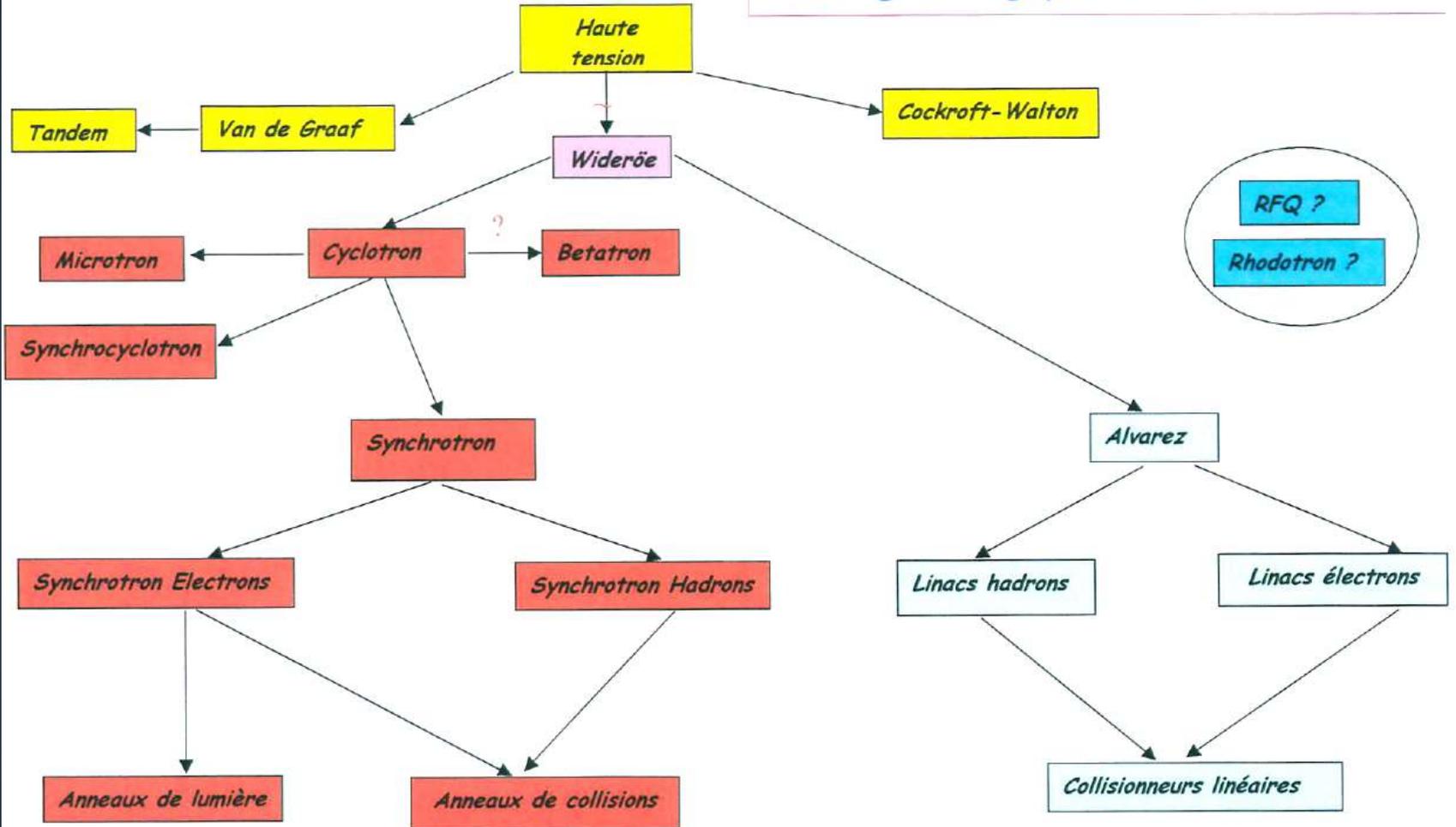
Quelques dates (non exhaustif)

- Début 20ème siècle: Rutherford
- Vers 1930: invention par Cocroft et Walton du premier accélérateur électrostatique de 700 kV, van de Graaf atteint 1.2 MV
- Invention du cyclotron par Lawrence
- Invention du linac par Wideroe
- 1944: Synchrotron (Mac Millan and Co)
- 1946: premier linac à protons type Alvarez par...Alvarez
- 1950: Focalisation forte par Christofilos)
- 1954: implantation de la focalisation forte à Brookhaven par Courant, Livingston et Snyder
- Saturne 1 sera néanmoins construit à focalisation faible (crainte des résonances)
- 1970: invention du RFQ (Radio Frequency Quadrupôle) aujourd'hui tête des linacs à ions
- Années 80: développement des aimants supraconducteurs, des sources ECR (Geller)
- Années 90: Développement des cavités supraconductrices
- LEP: début années 90, pendant environ 10 ans.
- ESRF: premier faisceau en 1992

Accélérateurs à électrons ou à ions

- A même énergie cinétique, un électron est beaucoup plus rapide qu'un proton
- Il y a donc deux types de grandes machines
- **Les machines à particules légères**, où la vitesse des particules est celle de la lumière, et où les structures sont toutes identiques
 - Structures périodiques
 - Fréquence fixe
- **Les machines à particules lourdes**, où la vitesse varie
 - Structures différentes selon l'énergie dans les linacs
 - Fréquences variables dans les anneaux

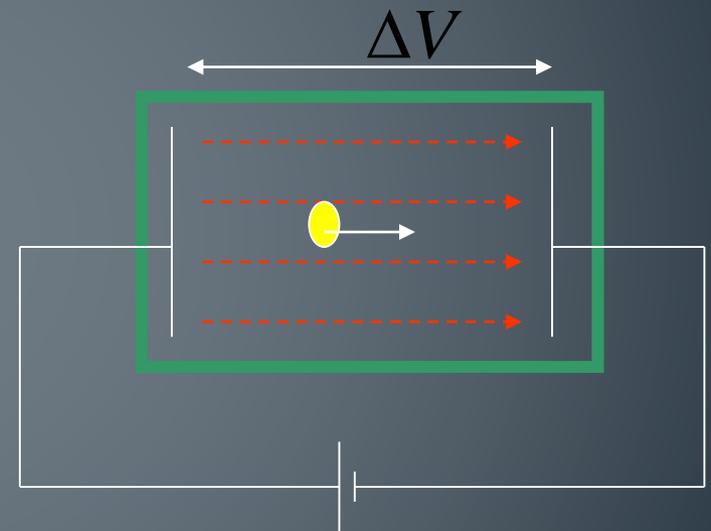
Arbre généalogique des accélérateurs



Le principe de l'accélération

- Accélération par un champ électrique statique
- L'énergie est indépendante de la masse de l'ion
- Unité: l'électron-volt
- Ou l'eV par nucléon
- Unités pratiques: le MeV, GeV, TeV

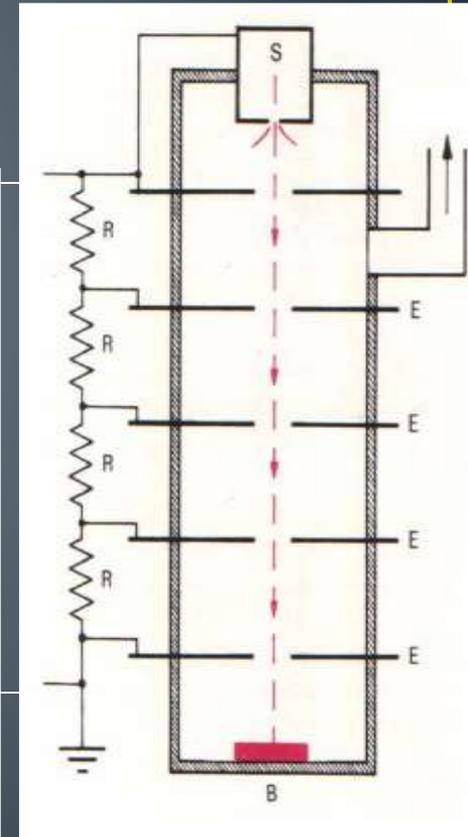
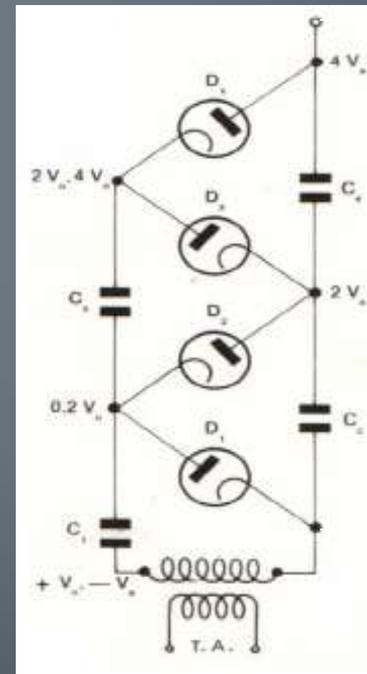
Energie stockée dans le LHC (10^{14} protons de 7 TeV) versus un Boeing 747 de 170 tonnes?



$$\Delta E = q\Delta V$$

Accélérateurs électrostatiques

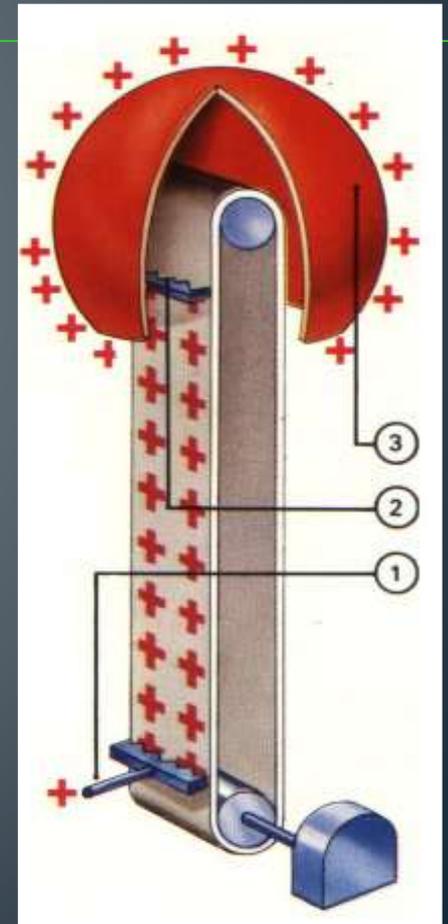
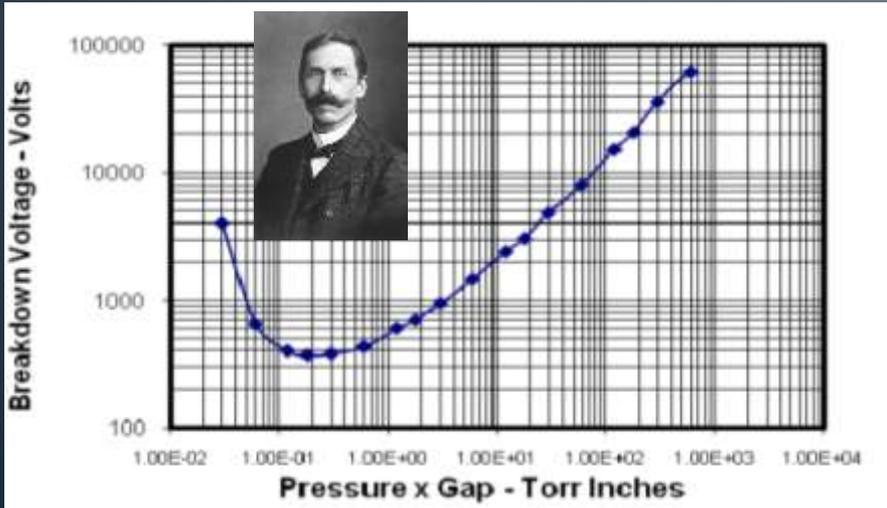
- Cockroft, Walton et Ernest
- Limité à 1.25 MV
- Toujours en usage (injecteur de PSI), Fermilab



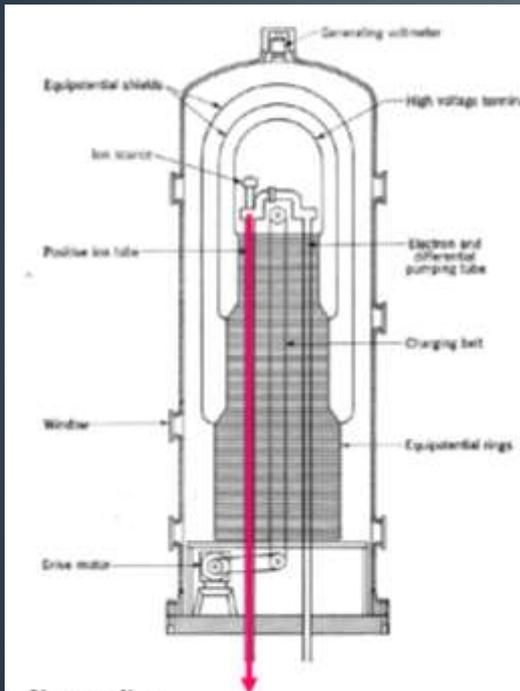
Limitation en tension (claquages).

Loi de Paschen - Accélérateurs Van de Graaf

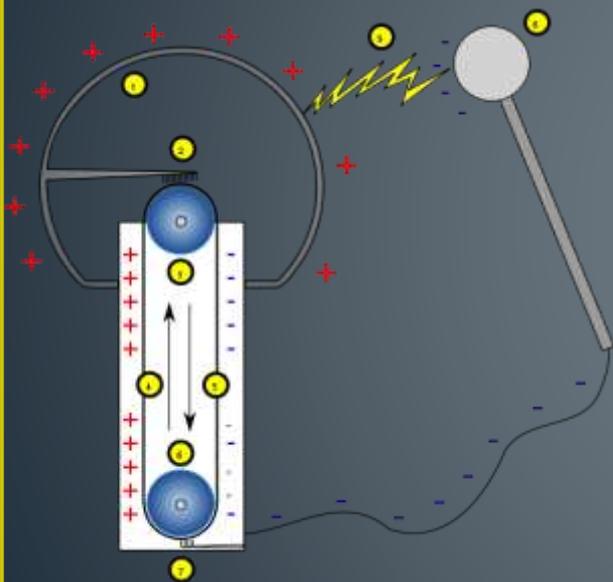
- Air: 3MV/m
 - Vide: 25 MV/m en théorie
 - Air sec, Azote ou SF₆ sous pression
- 10 MV



Van de Graaf - suite



Générateur Van de Graaf: avantages



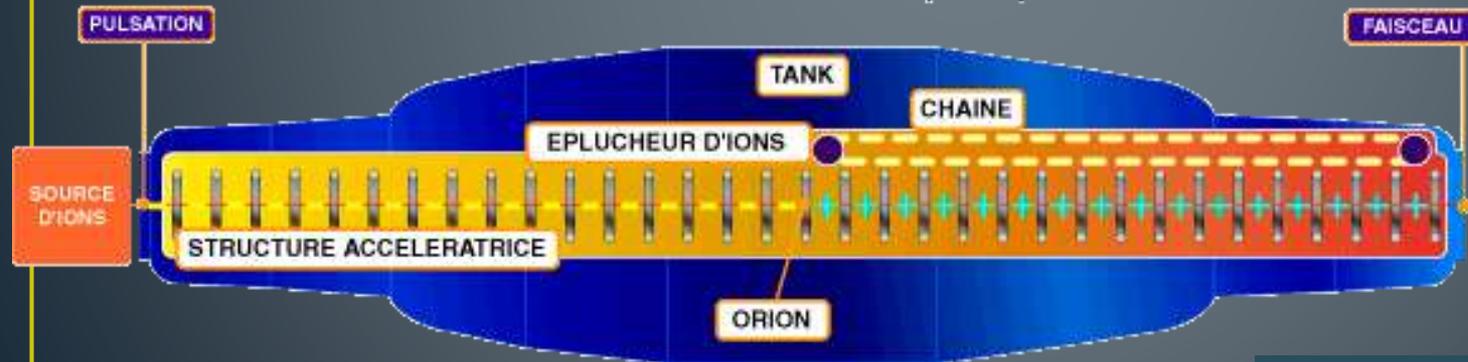
Tandem: l'exemple d'Orsay

■ Qualités et défauts

- Qualité faisceau, cylindrique, continu
- E variable
- Limité en tension



TANDEM : Schéma de principe

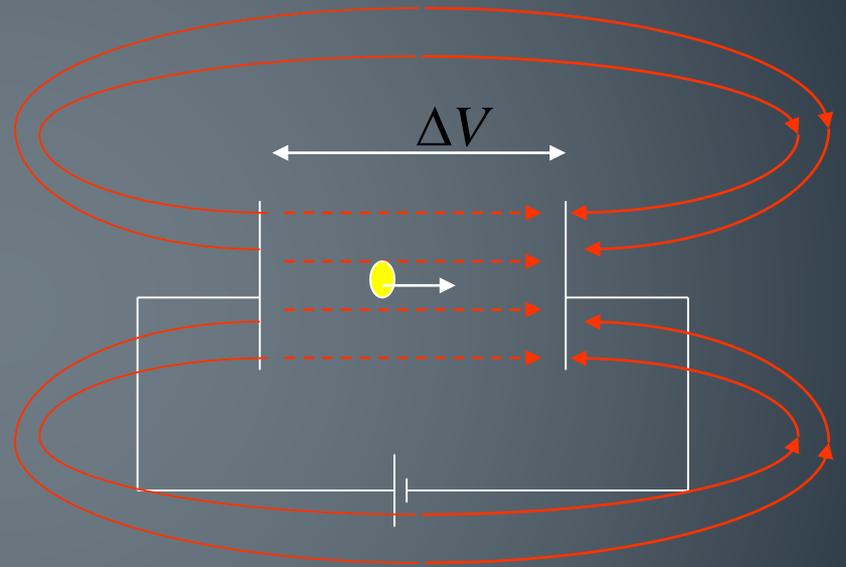


Tandem ORSAY: 15 MV – Ions Hydrogène, Hélium, Carbone, NH etc

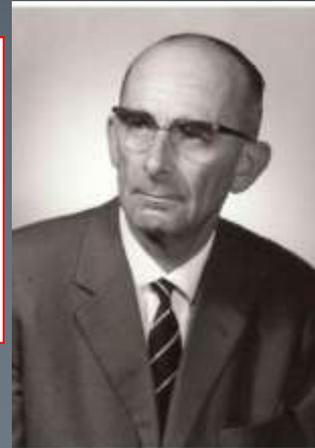
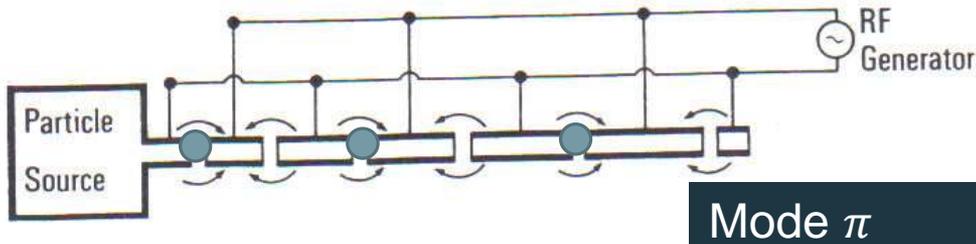
18-25 MV au terminal
 $T=V(1+Q)$

Et si l'on veut plus de 20 MV et/ou une structure compacte?

- Il suffit de repasser dans la machine
- Mais ça ne marche pas avec un potentiel statique:
- Le champ est décélérateur à l'extérieur
- $E=qV$ avec $V(v=0)=0$

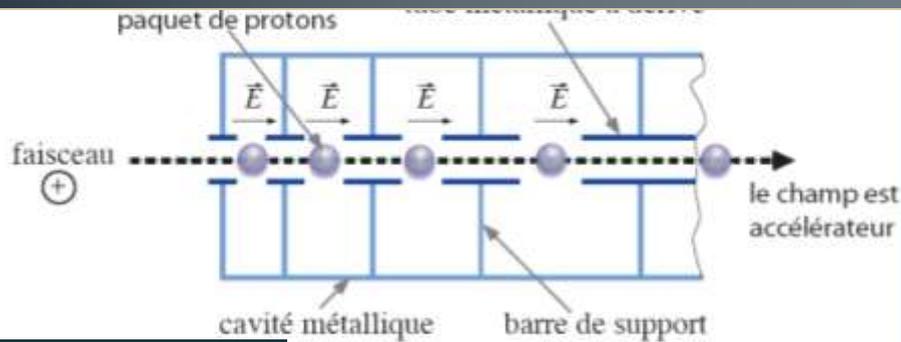


La solution: l'accélération radiofréquence (Wideröe)

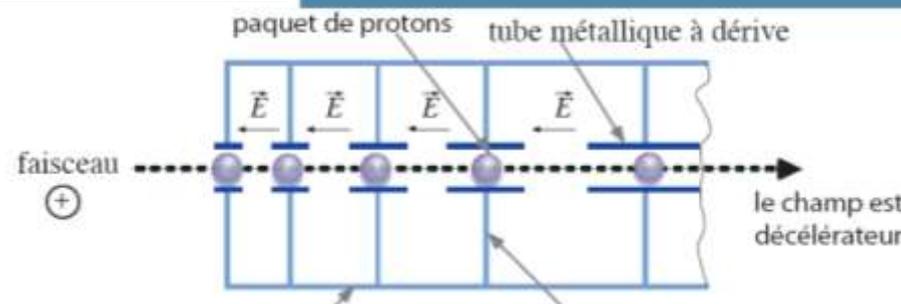


$$L = n\beta \frac{\lambda}{2}$$

Mode π ou 2π



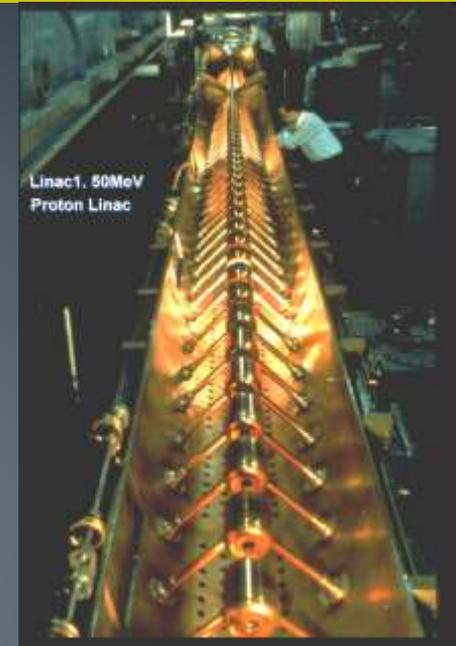
Mode 2π



2P3 Béné Fig. 3.7: Rolf Wideröe in front of one of the linac models in the

Quelques exemples

- Le LINAC (ici CERN, protons)
- Le cyclotron
- Le synchrotron



Problèmes de cavités

cavité

couplage

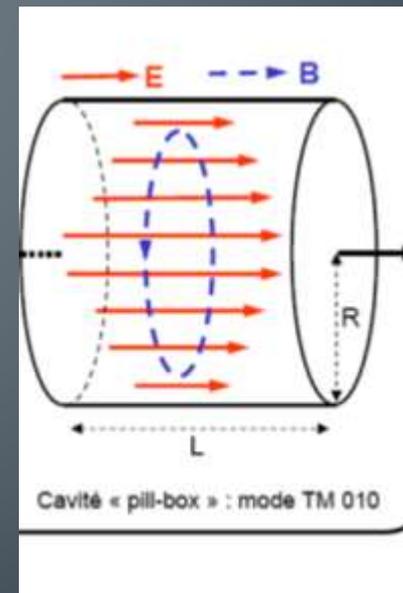
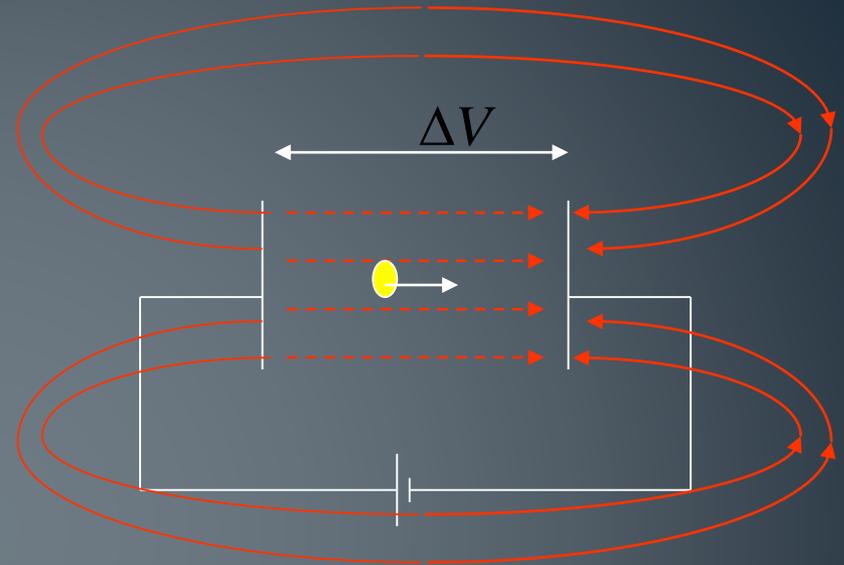
ondes stationnaires

Quelques questions

- **Comment fabriquer de très hautes tensions/champs?**
 - Cavité résonnante
 - Coefficient de surtension
 - Cf Jean-Luc
- **Comment les alimenter efficacement?**
 - Couplage et coupleur, amplificateurs, klystrons etc.
 - Puissance incidente et puissance réfléchie
 - Cf Serge Sierra

Cavité: piégeage d'une onde électromagnétique

- La boîte à pilules résout le problème du champ statique
- Il faut piéger l'onde EM
- Condition: E maxi au milieu, nul sur les bords. Condition de **résonance** pour une certaine fréquence
- Zones de courant donc inductives
- **Zones de champ donc capacitives**
- Zones résistives donc pertes
- On passe autant de fois que nécessaire

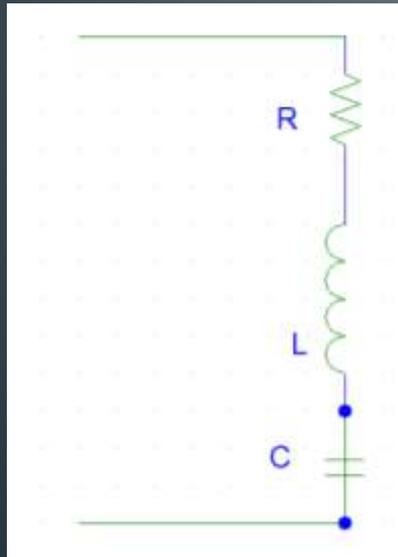
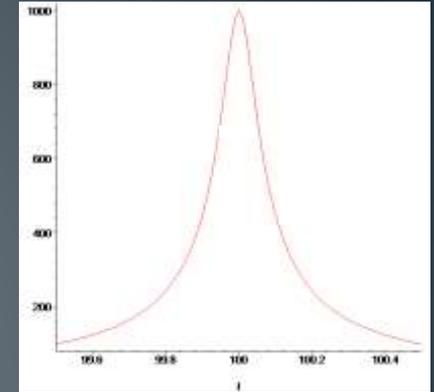


Obtention d'une tension élevée: le circuit résonant, pas le transformateur!

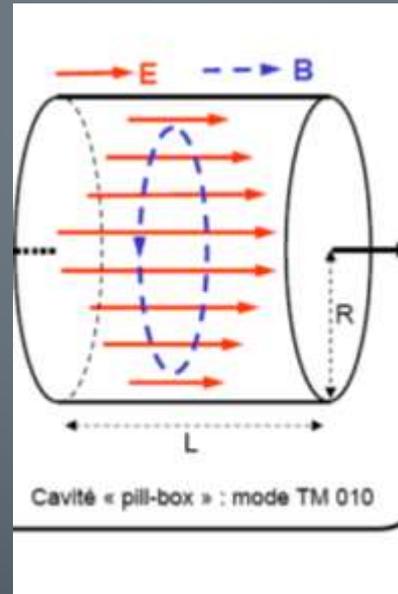
- A la résonance, la tension aux bornes de la capacité est multipliée par le facteur de surtension Q

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



V_g



V_c

$$\frac{(\Delta f)_{3dB}}{f_0} = \frac{1}{Q}$$

$$Q = 2\pi \frac{\text{Energie stockée}}{\text{Energie perdue par période}}$$

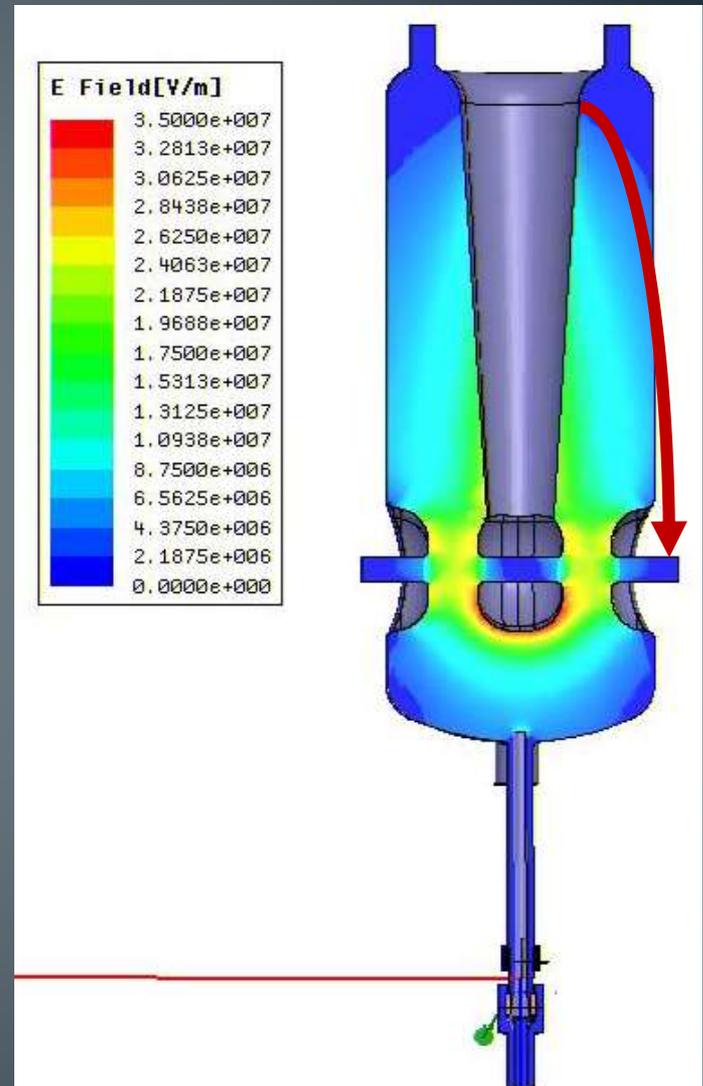
Q: 10000 pour non supra
Q: 10^8 10^9 en supra

$$V_c = Q \cdot V_G$$

Apport d'énergie: le couplage

ex: cavité pour SPIRAL2

- Cavité quart d'onde (une extrémité à champ nul –court circuit-, une extrémité libre – champ électrique)
- Un coupleur électrique dans une zone de champ électrique
 - ANTENNE
- On aurait pu avoir un coupleur magnétique dans une zone de champ magnétique
 - BOUCLE avec la masse

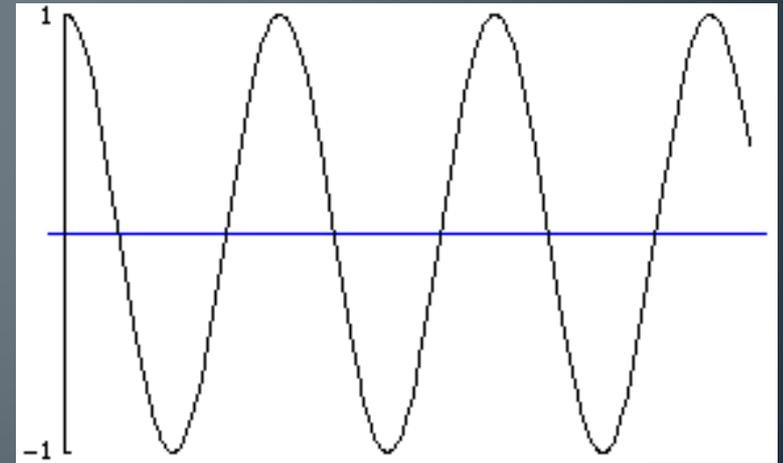
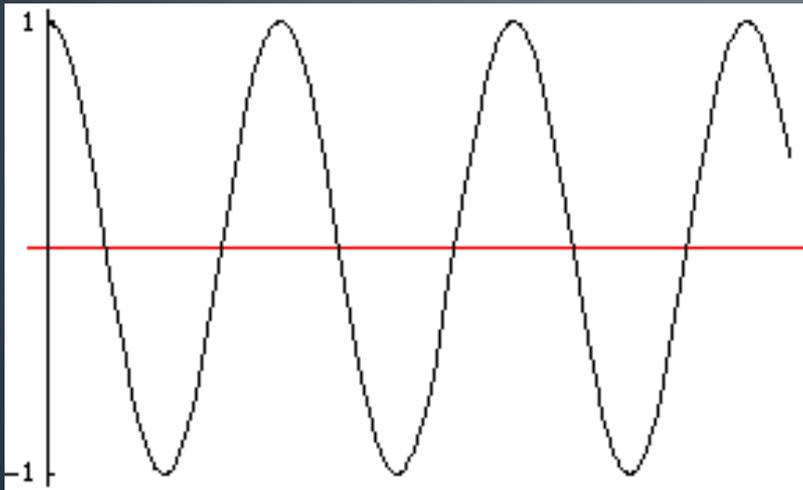


Le problème des ondes stationnaires

- **Longueurs d'onde dans le vide**
 - 30 MHz: 10m
 - France-Inter: 3m
 - 300 MHz: 1m
 - 2.45 GHz (four microonde): ~ 10 cm
- **Conséquence**
 - Si la longueur des connexions devient comparable ou inférieure à la longueur d'onde, les temps de propagations ne peuvent être négligés
 - Une variation de tension à un bout de câble ne se transmet pas instantanément à l'autre bout
 - Propagation de cette variation: onde incidente
 - Il se passe la même chose dans l'autre sens: onde réfléchie
 - Onde incidente + onde réfléchie = onde stationnaire
- **Un conducteur n'est plus équipotentiel**

Ondes progressives et stationnaires

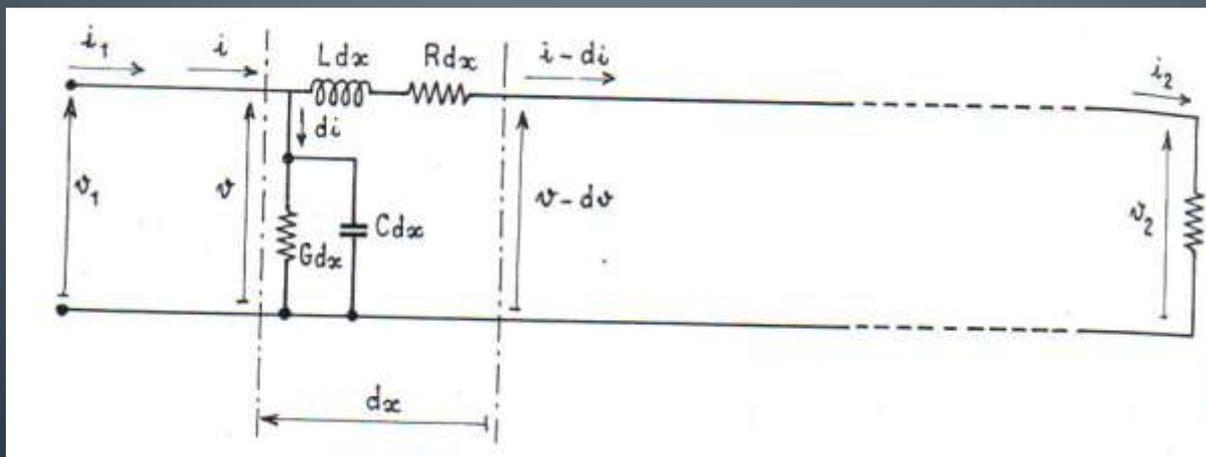
OS = onde incidente + onde réfléchie



100 kW mal injectés = 100 kW réfléchis = accélérateur qui n'accélère pas
= machine cassée = \$\$\$\$\$\$\$\$\$\$

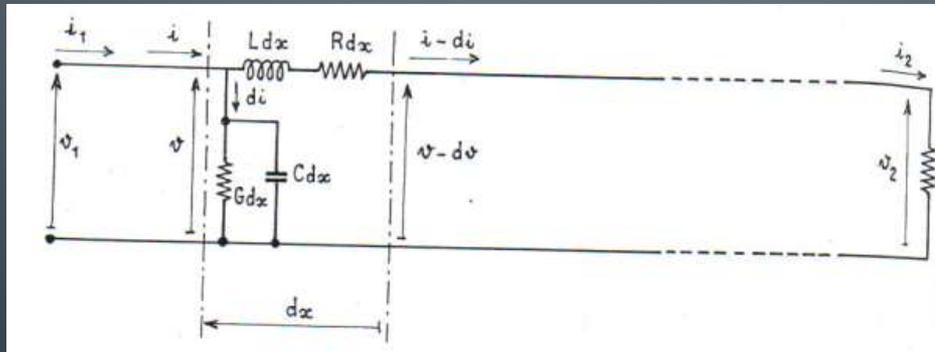
Comment ne pas avoir de réflexion

- Ligne bifilaire (coax, paire torsadée...)
- On suppose la ligne sans pertes ($R=0$)
- $G=0$ (résistance infinie entre fils)
- Dans ce cas, il n'y a pas de réflexion si et seulement si la ligne est de longueur infinie
- Quelle est l'impédance d'une ligne infinie????



Impédance caractéristique

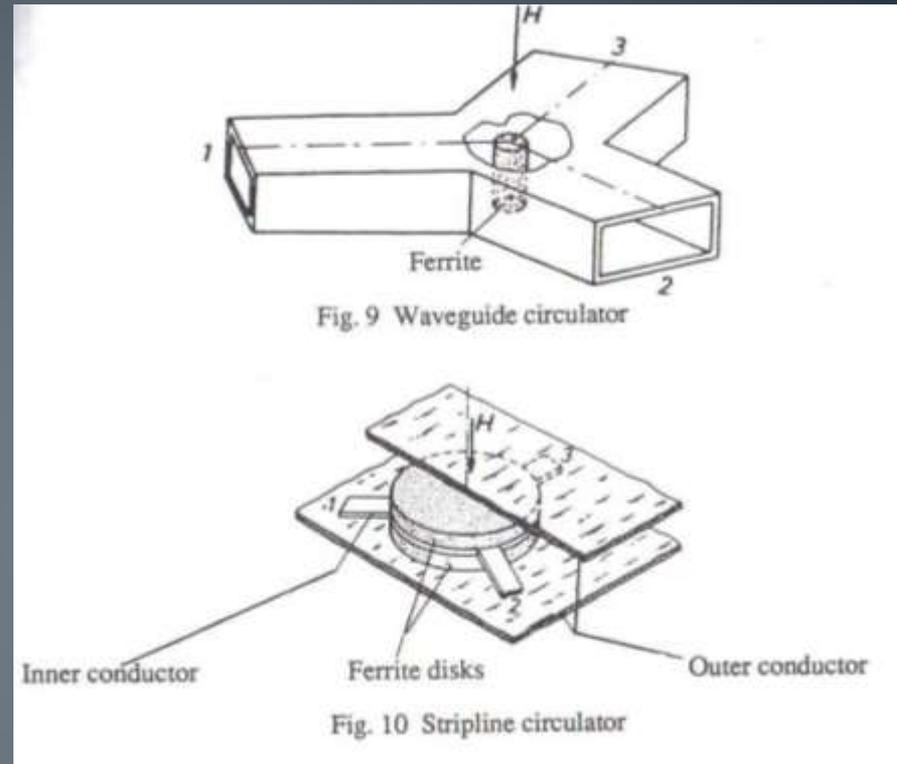
- $Z(x + dx) = \frac{Z}{jC\omega dx} \cdot \frac{1}{Z + \frac{1}{jC\omega dx}} + jL\omega dx = \frac{Z}{1 + jZC\omega dx} + jL\omega dx$
- $Z(x + dx) = Z \cdot (1 - jZC\omega dx) + jL\omega dx$
- $\frac{dZ}{dx} = -jC\omega Z^2 + jL\omega$ Nul pour $Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \equiv Z_c$
- Terminer une ligne par Z_c élimine les ondes stationnaires



Une structure RF classique

- Le coupleur est ajusté pour que l'impédance vue soit l'impédance caractéristique (faisceau+cavité+coupleur)
- En cas de mauvaise adaptation, l'énergie réfléchie passe à travers un circulateur (sorte de gyratoire)
- Toute l'énergie réfléchie est dissipée dans une résistance (typiquement 50 ohms)
- Nota: court-circuit=circuit ouvert=100% réflexion=problèmes

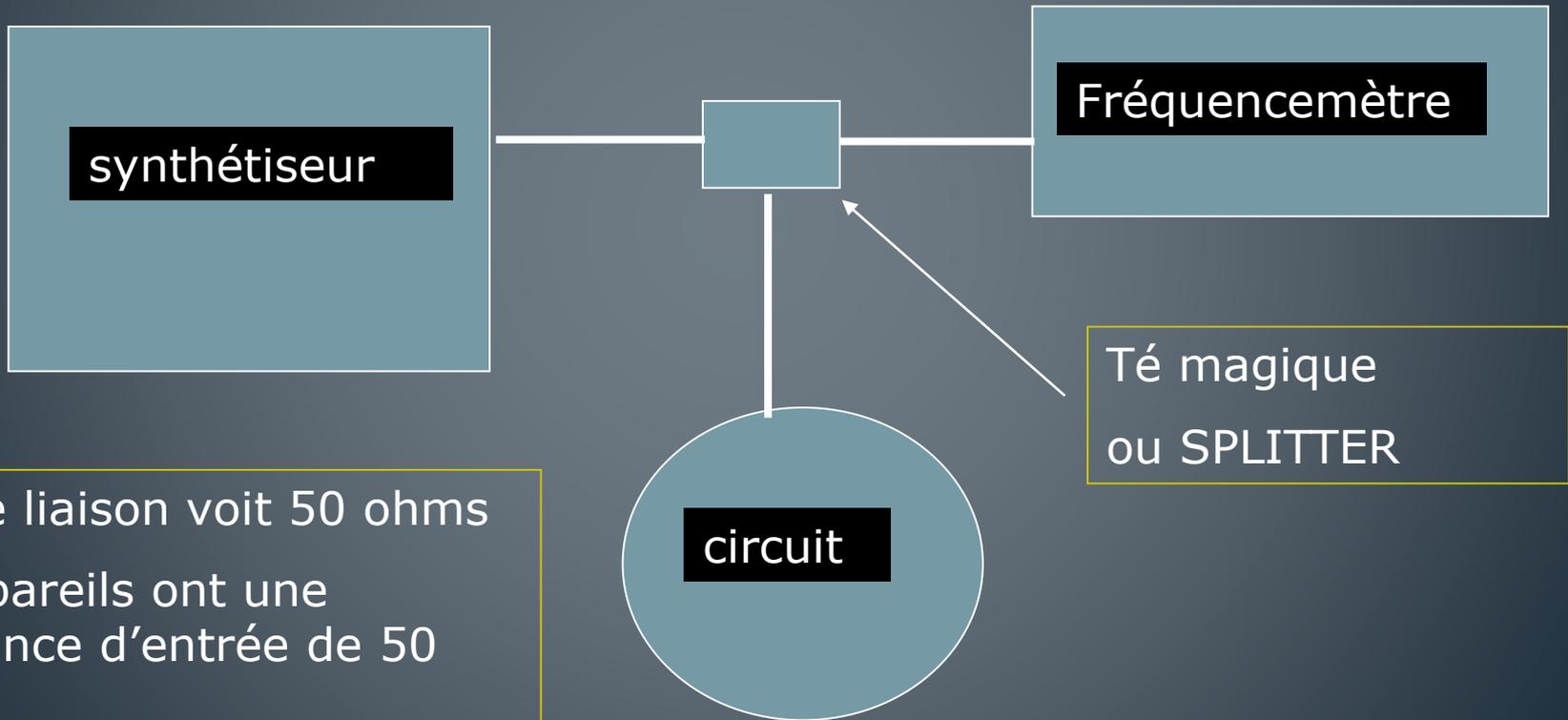
Circulateur



Absorbe le réfléchi et l'envoie sur une charge adaptée (50 ohms)



Exemple de montage



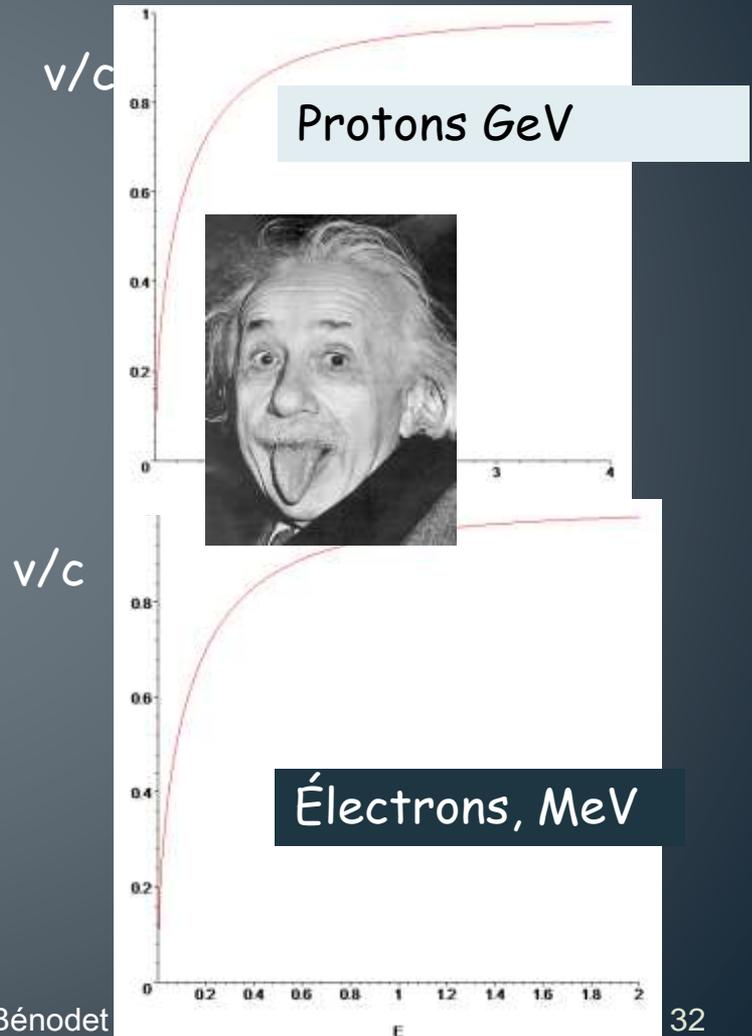
Chaque liaison voit 50 ohms
Les appareils ont une
impédance d'entrée de 50
ohms

Une cavité: comment ça marche?

- On transporte de l'énergie grâce à une onde incidente
- On adapte les conditions aux bouts pour voir l'impédance caractéristique
- Il n'y a donc pas d'onde réfléchie
- Toute l'énergie doit se dissiper
- Le courant et donc les champs montent à ce qu'il faut pour tout dissiper
- Moins la cavité est résistive plus le champ doit être élevé

La structure doit être adaptée à la vitesse: à cause d'Albert

- Structures à électrons: vitesse constante
- Structures à protons: vitesse variable
- Les machines à protons devront avoir une structure variable en fonction de la vitesse
 - Cavités de types différents pour les linacs
 - Cavités large bande pour les synchrotrons

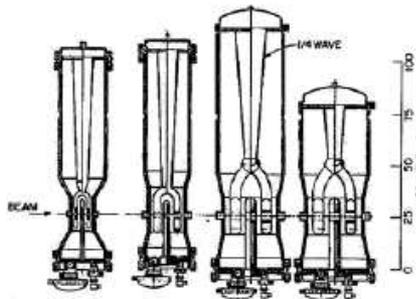


Panorama

$\beta = 0,01$

$\beta = 0,1$

$\beta = 1$



Structures inter-digitales (ATLAS, Argonne)
48 et 72 MHz - $\beta = 0,009$ à $0,037$



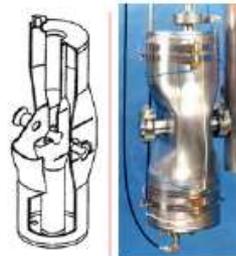
RFQs supra (Legnaro)
80 MHz - $\beta = 0,009$ à $0,035$



Résonateurs split-ring (ATLAS, Argonne)
97 et 145 MHz - $\beta = 0,06$ à $0,16$



Résonateurs quart d'onde (ALPI, Legnaro)
80 à 352 MHz - $\beta = 0,047$ à $0,25$



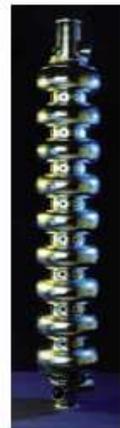
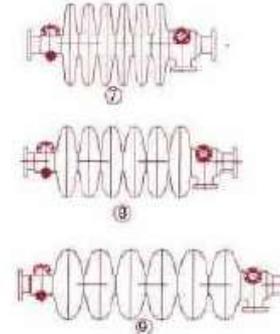
Résonateur demi-onde (Argonne)
355 MHz - $\beta = 0,12$

Cavité ré-entrante (Legnaro)
352 MHz - $\beta \geq 0,1$



Cavités spoke (CNRS Orsay)
352 MHz - $\beta = 0,15$ et $0,35$

Cavités elliptiques
350 MHz à 3 GHz - $\beta = 0,47$ à 1



Cavité TTF
1,3 GHz - $\beta = 1$

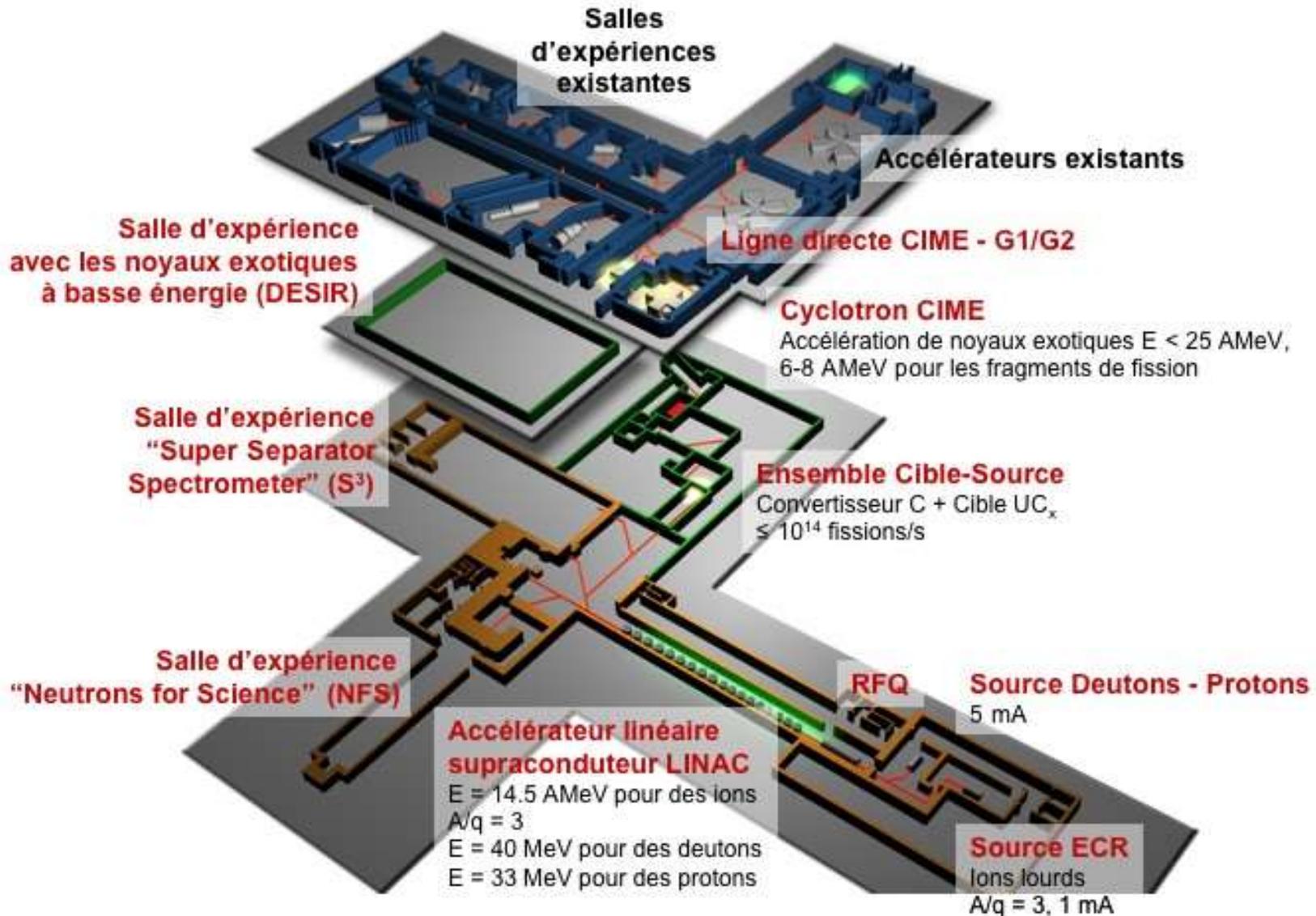


Cavité APT (Los Alamos)
700 MHz - $\beta = 0,64$

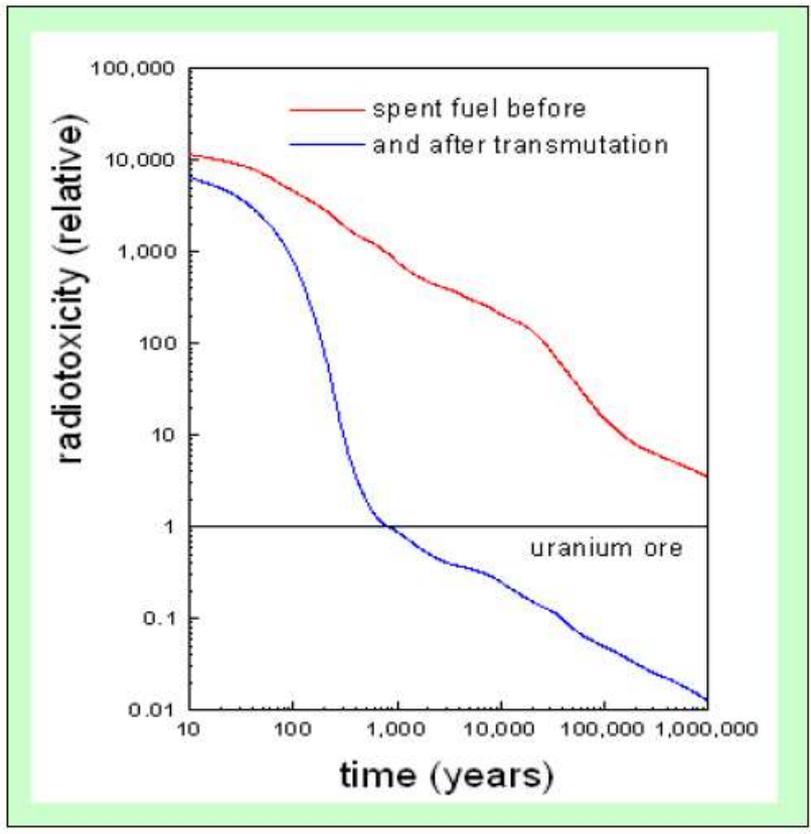
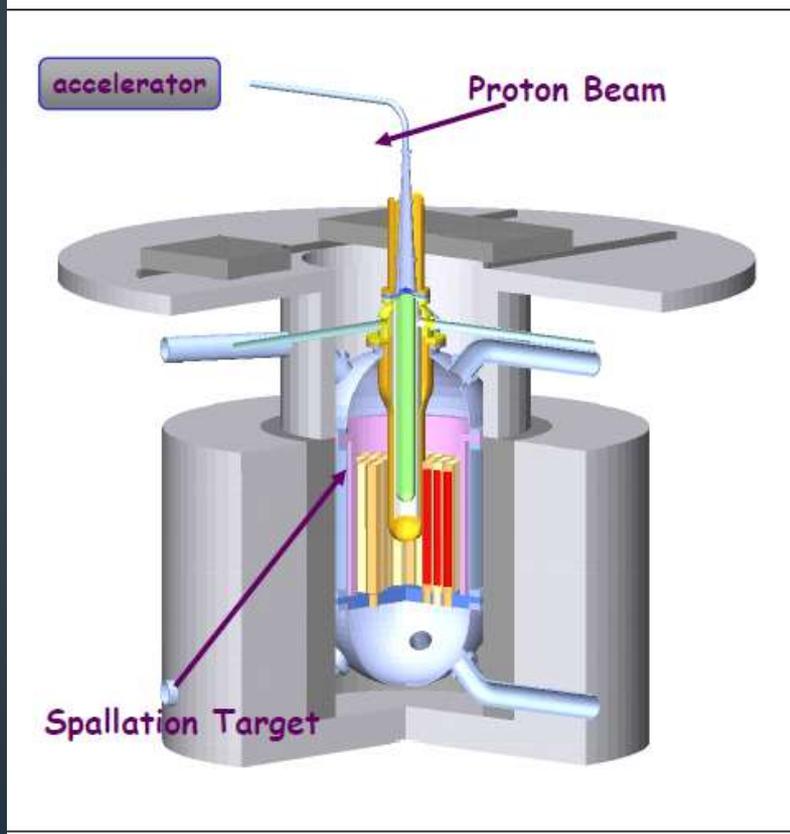
Rappel : $\beta = v/c$ ($c \approx 2,998 \cdot 10^8$ m/s)

Quelques machines

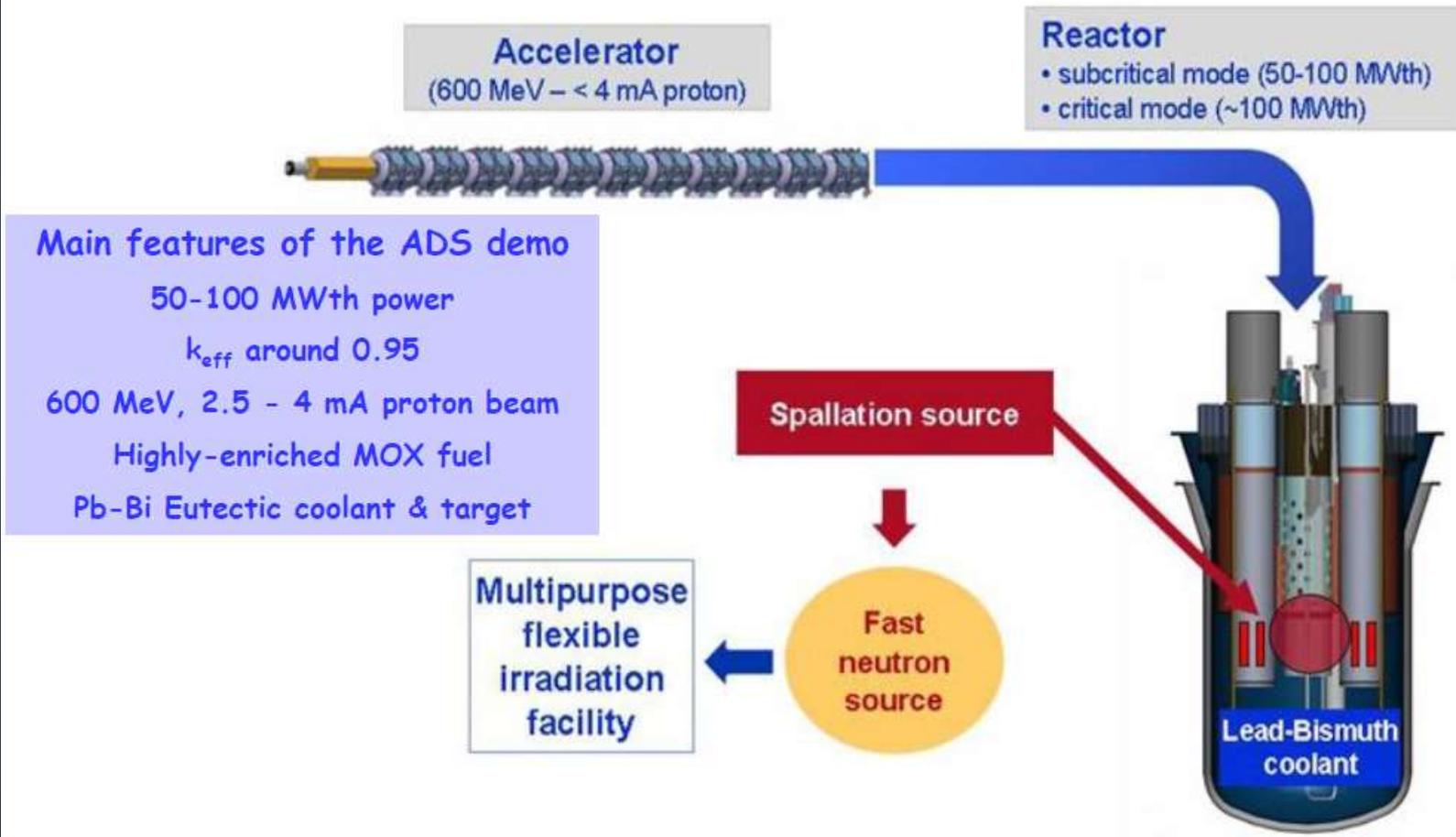
SPIRAL2



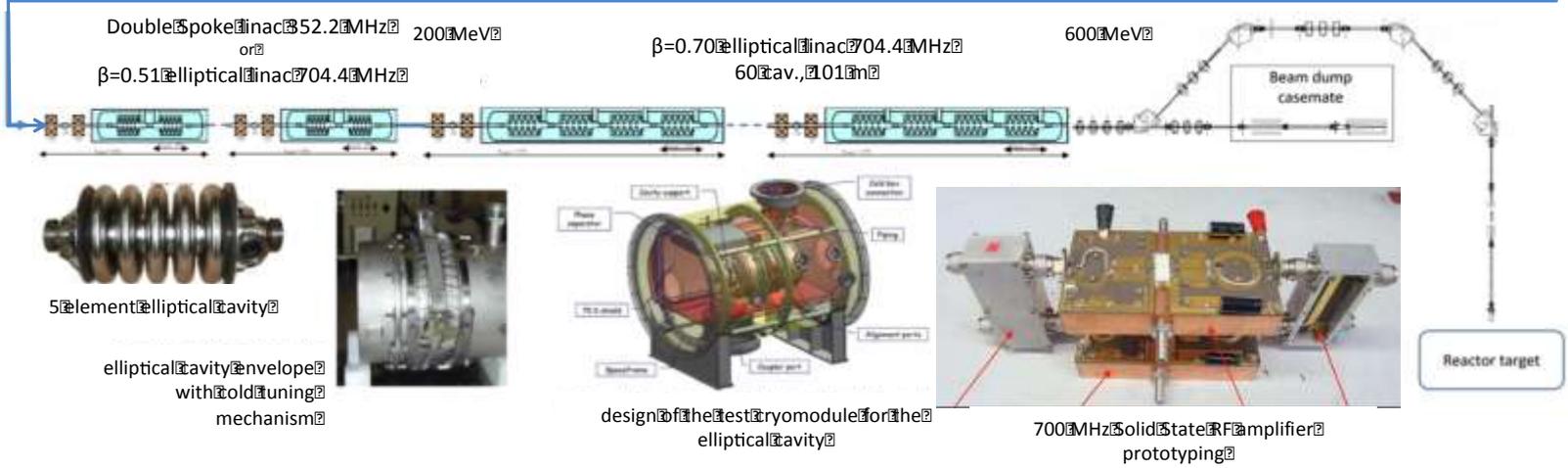
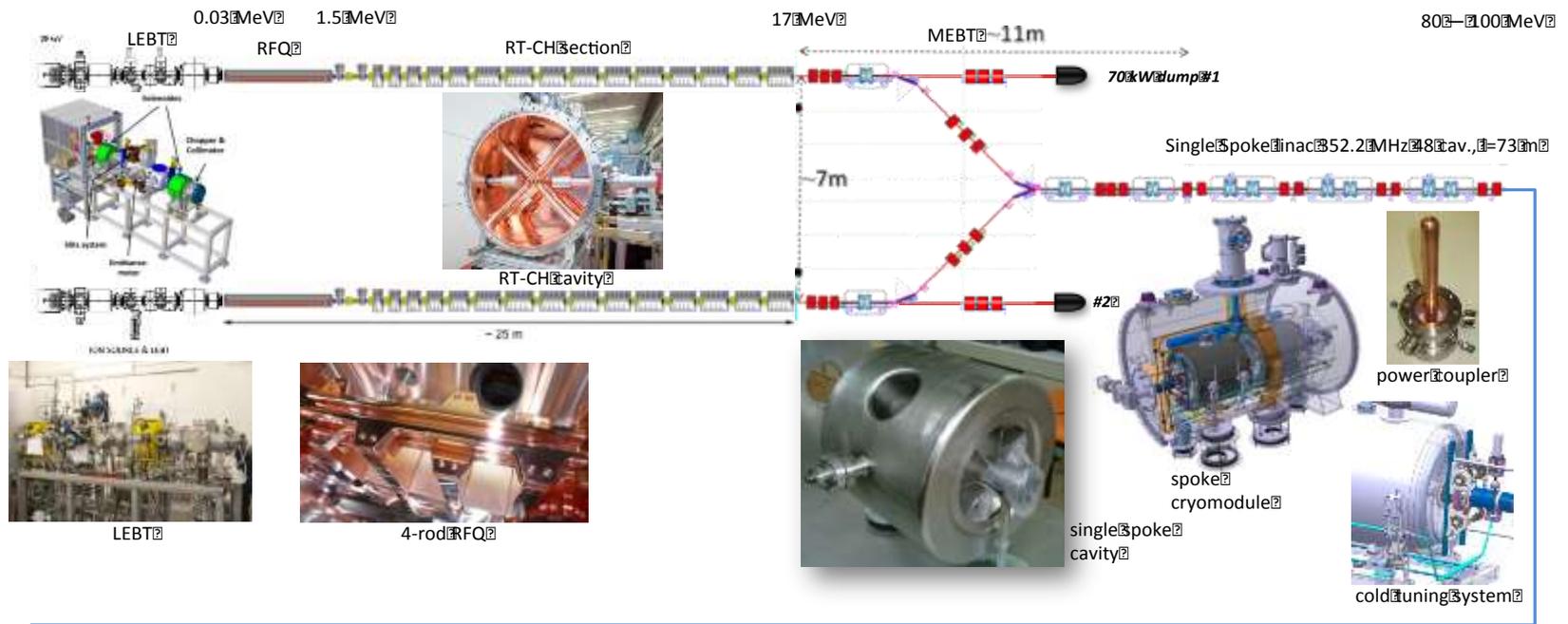
Accelerator Drive Systems: Incinération des déchets nucléaires



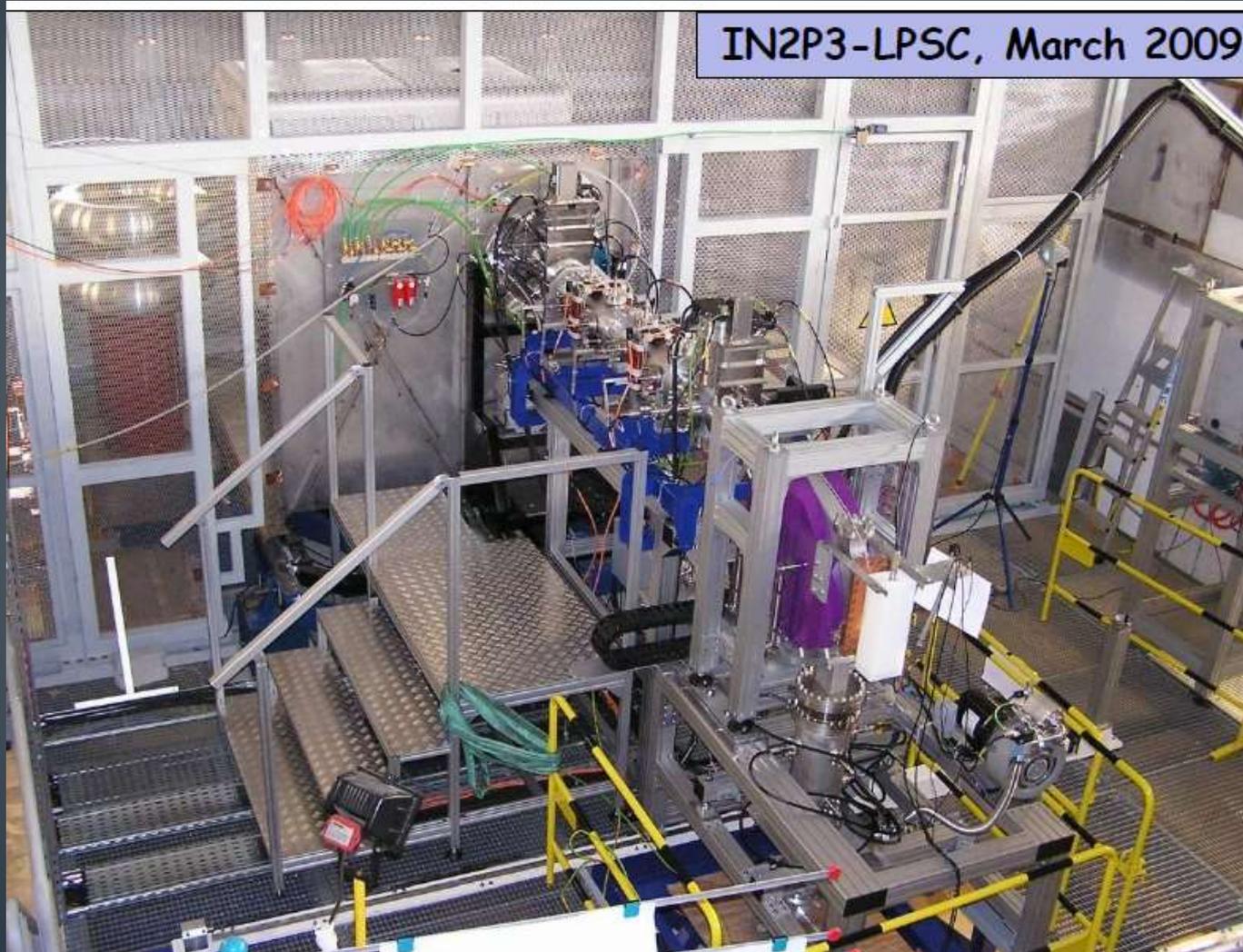
ADS Demonstrator = MYRRHA



MYRRHA accelerator design

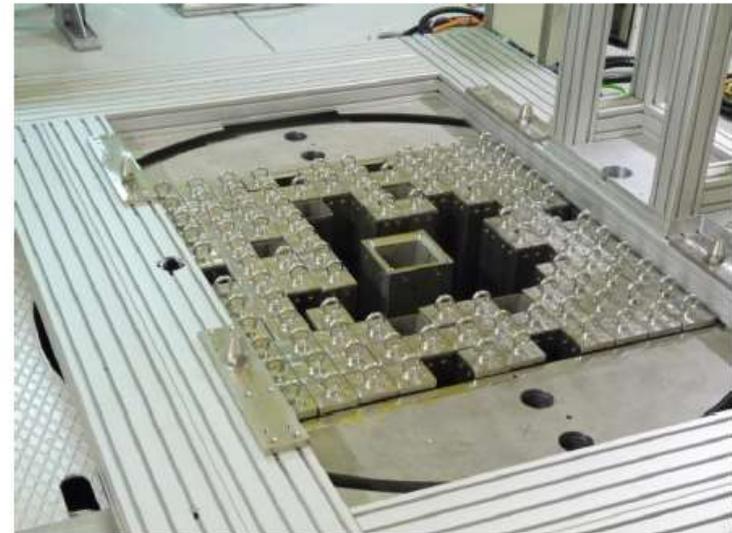
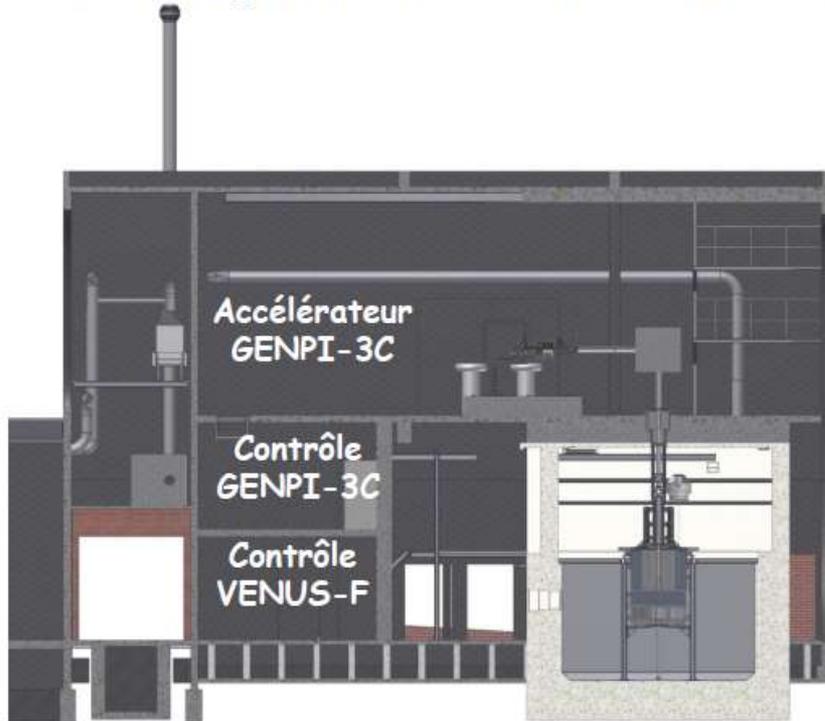
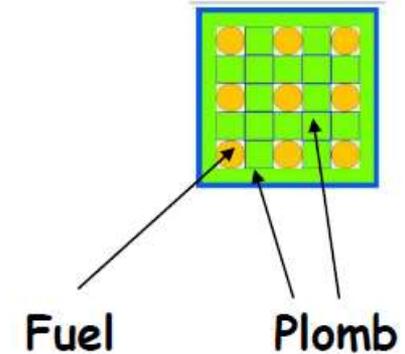


Avant MYRRHA: GUIVENERE@MOL



GUINEVERE (suite)

- neutron source **GENEPI-3C (CNRS-IN2P3)**
- **VENUS** experimental reactor (**SCK-CEN**)
- **VENUS** was light-water moderated but is transformed for **GUINEVERE** into a fast lead-moderated reactor
- 360 kg 30% enriched metallic U-235 fuel (**CEA**)



Ecole IN2P3 Accélérateurs, 5-9 Décembre 2011

Alex C. Mueller

79

Optique des faisceaux

Forces

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

$$\frac{dm\vec{v}}{dt} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

- Electrique: \parallel E \rightarrow Accélération et guidage
- Magnétique: \perp à v et B (règle des 3 doigts) \rightarrow Guidage

Energie cinétique

$$T = \frac{1}{2}mv^2$$

Non relativiste

$$\gamma_L = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_L^2}}$$

$$\text{et } m = \gamma_L m_0$$

relativiste

$$E = \gamma_L m_0 c^2$$

$$T = E - m_0 c^2 = (\gamma_L - 1)m_0 c^2 \approx \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{si } v \ll c$$



Potentiel, énergie, qté de mouvement

$$\Delta T = qV = neV$$

$$\vec{p} = \gamma m_0 \vec{v} \equiv m \vec{v}$$

$$m_0 c^2 \equiv eV_0$$

- 1 électron-volt = 1 électron accéléré sous 1 volt.

$$1eV = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ joules}$$

- Un électron accéléré sous $V=300$ V: $T = 300$ eV
- Un carbone 12 de charge $4+$ accéléré sous 9kV : $T=36$ keV soit 3 keV par nucléon.

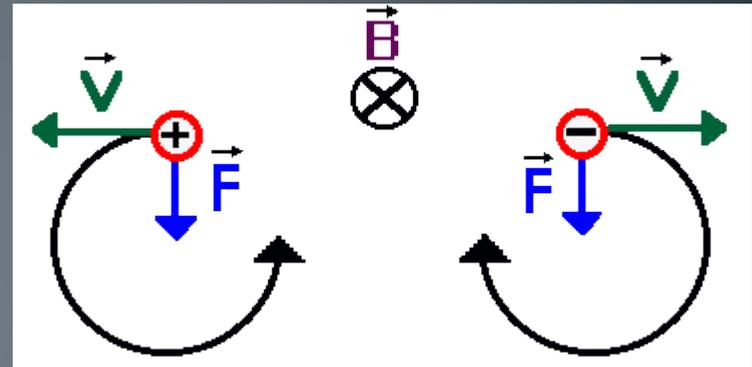
Rigidité magnétique

- Rayon de courbure dans un champ magnétique:

$$\rho = \frac{mv}{qB} = \frac{\gamma \cdot m_0 v}{qB}$$

- $B\rho = \frac{mv}{q} = \frac{\gamma \cdot m_0 \beta c}{q}$ est LA

quantité unique qui caractérise la trajectoire dans un champ magnétique



Deux particules confondues au départ, de même rigidité, quelles que soient leurs nature ou leur charge, auront la même trajectoire dans une structure magnétique. Le champ magnétique sépare les particules selon leur rigidité.

Repérage des particules

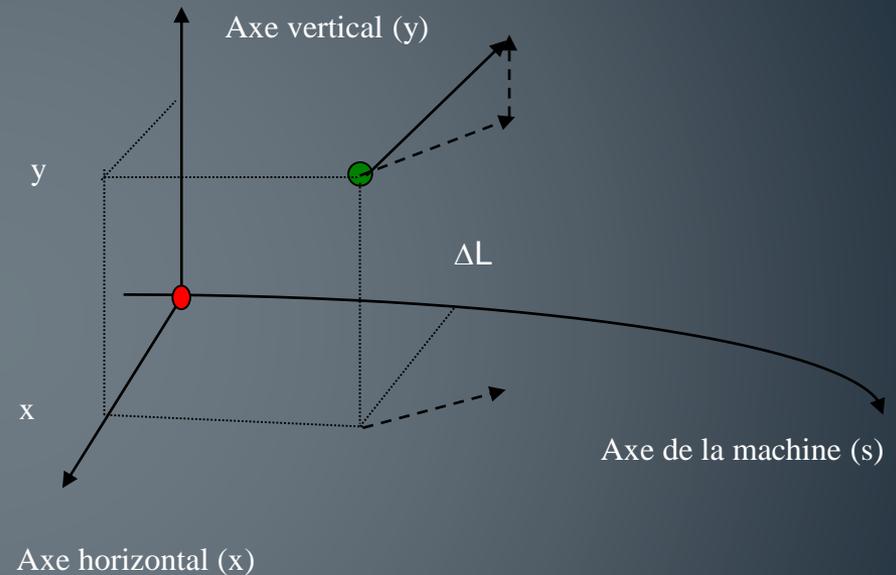
- Trajectoire et particule de référence

$$x' = \frac{p_x}{p_L} \quad y' = \frac{p_y}{p_L}$$

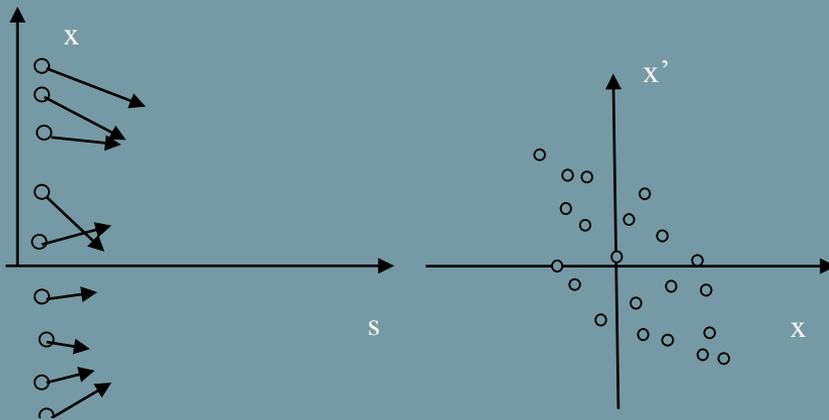
- Conditions de Gauss

x, x', y, y' petits

- $(x, x', y, y', \Delta L, \Delta p/p_0)$

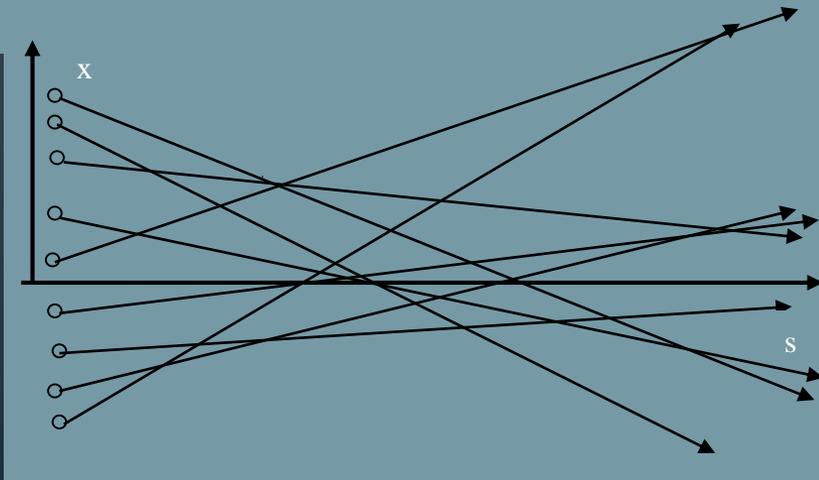


Faisceau réel et émittance



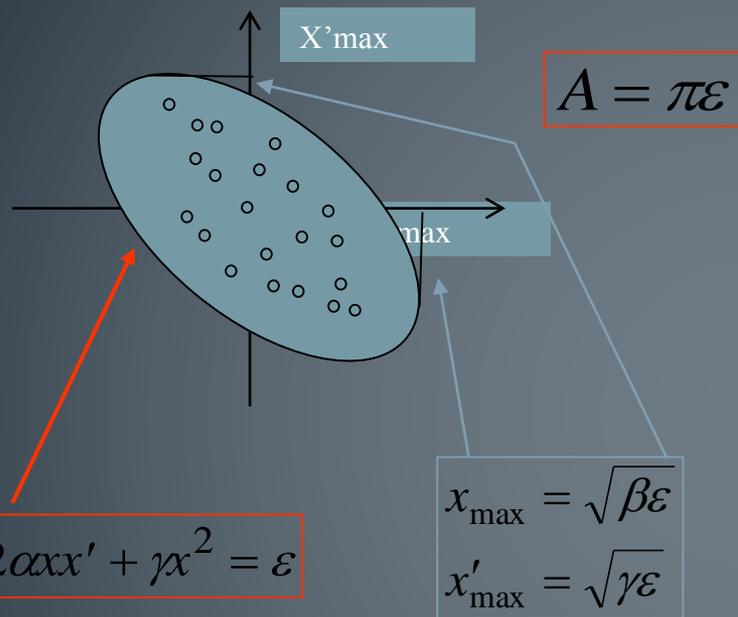
- Exemple sur espace sans champ
- (x, x') uniquement ici
- Minimum d'enveloppe (« waist » ou « col »)

- ➔ Caractériser globalement
- ➔ Émittance quadratique moyenne (« RMS »)



Emittance quadratique moyenne

on part des données statistiques du faisceau



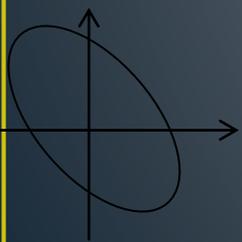
$$\beta\gamma - \alpha^2 = 1$$

$$\epsilon_{RMS} = \sqrt{\sigma_x^2 \cdot \sigma_{x'}^2 - \sigma_{xx'}^2}$$

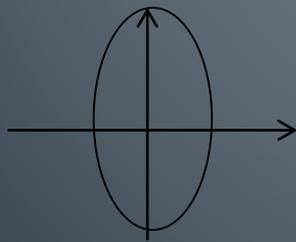
$$\beta \epsilon_{RMS} = \sigma_x^2 \rightarrow \beta = \frac{\sigma_x^2}{\epsilon_{RMS}}$$

$$\gamma \epsilon_{RMS} = \sigma_{x'}^2 \rightarrow \gamma = \frac{\sigma_{x'}^2}{\epsilon_{RMS}}$$

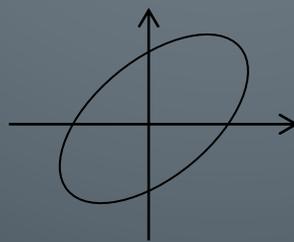
$$\epsilon = k \cdot \epsilon_{RMS}$$



$\alpha > 0$ (convergent)



$\alpha = 0$ (waist)



$\alpha < 0$ (divergent)

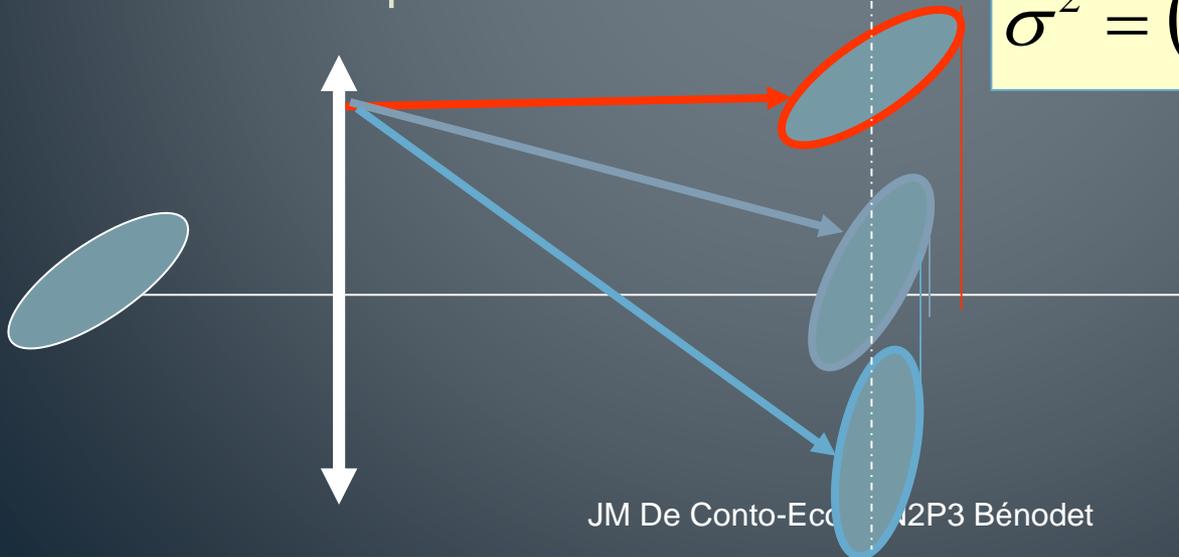
Plus ou moins de particules
incluses selon k et la distribution

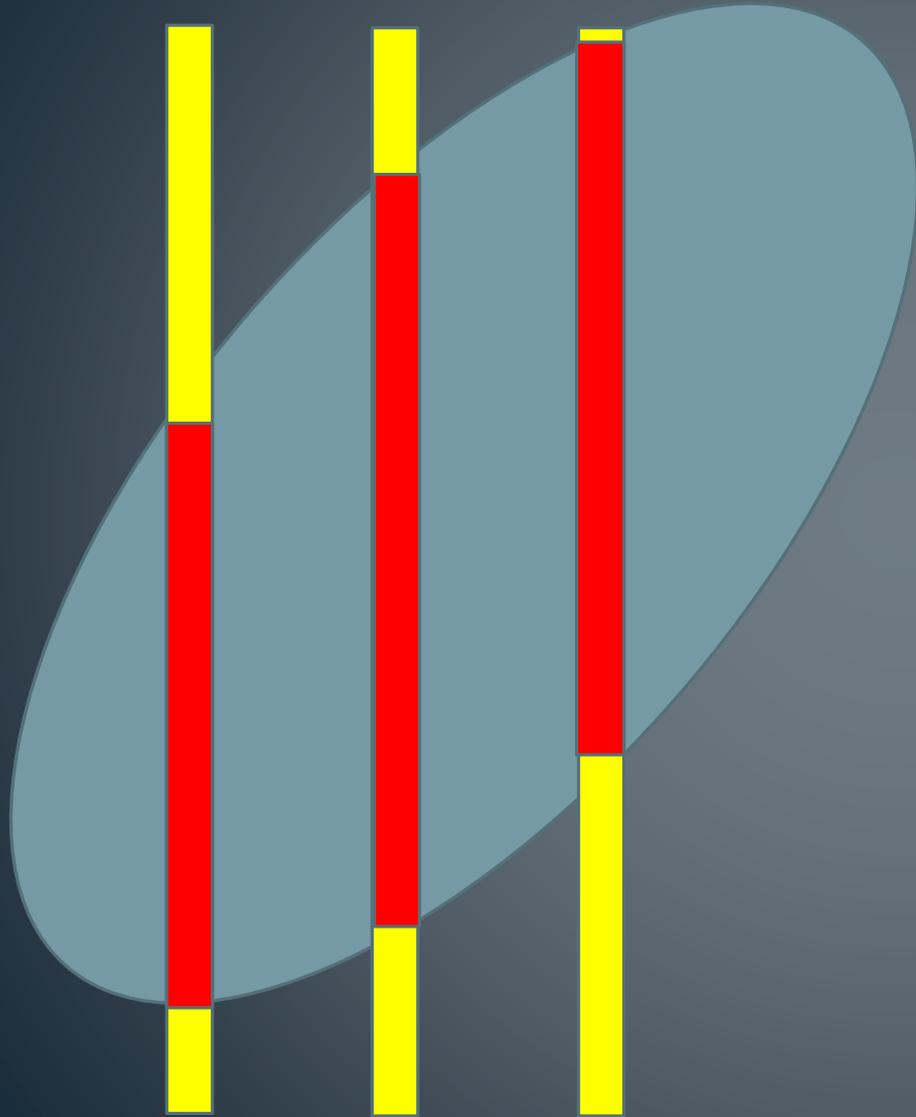
Méthode des 3 gradients et émittance RMS

- La dimension quadratique moyenne varie le long de la structure en fonction de la focalisation
- Elle est reliée aux paramètres d'émittance
- On utilise une lentille connue dont on fait varier la force de focalisation
- On effectue N mesures de profil
- On obtient N équations à 4 inconnues

$$\langle x^2 \rangle = \sigma_0^2 = \beta_0 \varepsilon_{RMS}$$

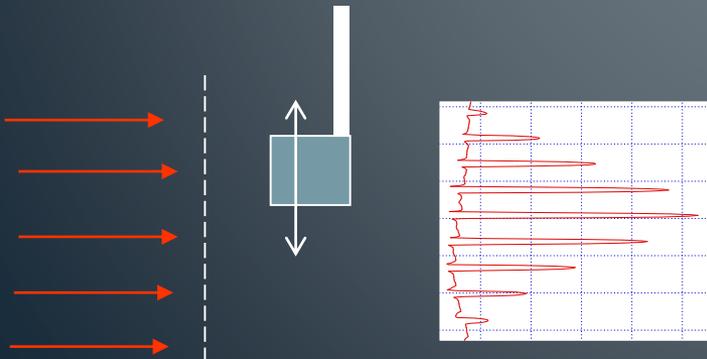
$$\sigma^2 = (A\beta + B\alpha + C\gamma) \varepsilon_{RMS}$$



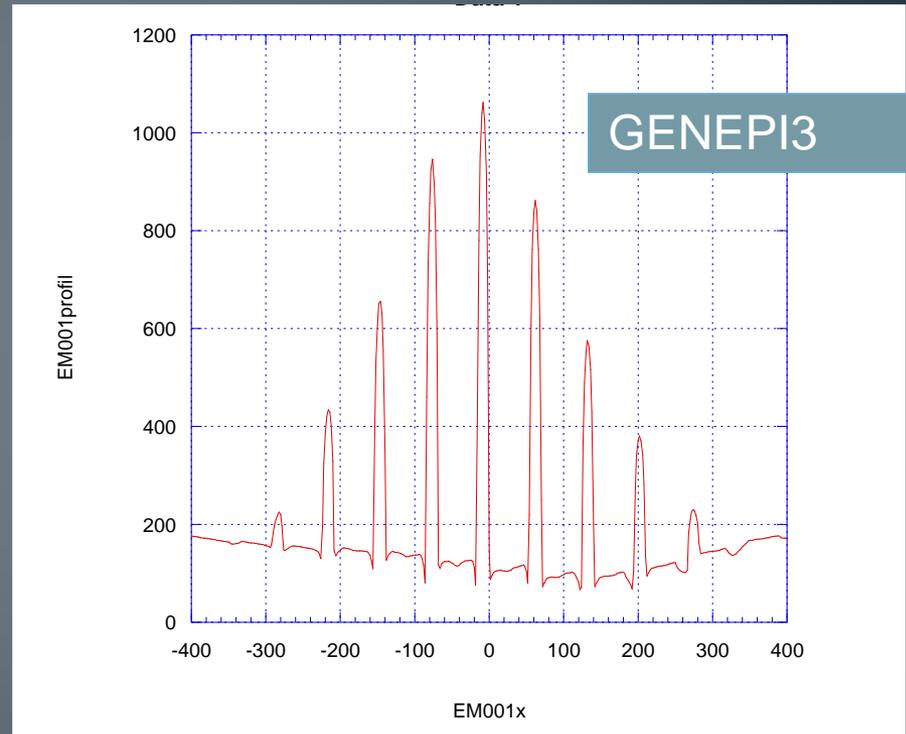


Mesures d'émittance par la méthode du pepper-pot

- ❑ Chambre à sténopé (pepper-pot en français!)
- ❑ Trous $\Phi 1.5\text{mm}$, entraxe 6.5mm sur un diamètre
- ❑ Coupelle de Faraday 52 mm en aval
- ❑ Ecartement de l'entraxe \rightarrow divergence ou convergence du faisceau
- ❑ **Elargissement des trous** \rightarrow divergence locale (épaisseur de l'ellipse)



10èmes de mm et UA

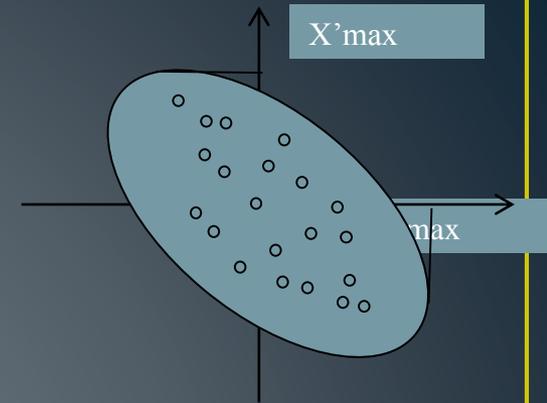


Faisceau centré à 0.8mm près

Une émittance c'est quoi?

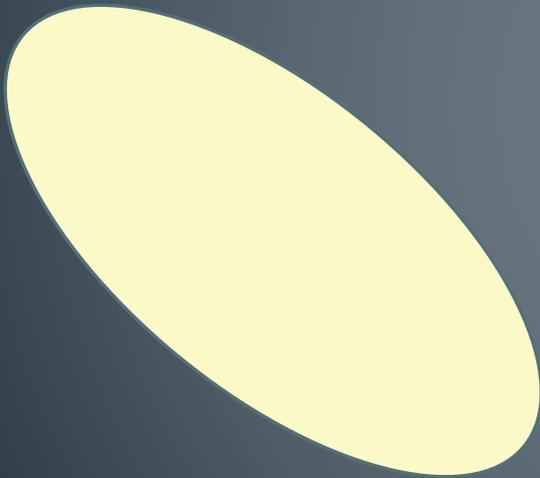
- Un angle se transforme en position transverse
- Une position se transforme en angle
- Le faisceau contient un ensemble de(position, angle)
- L'occupation de l'espace est dû à l'émittance.

- Unité: mètre.radian=mètre
- 1 mm.mrad=1 micromètre
- On dit parfois que $\varepsilon = 5\pi$
- On dit parfois que l'émittance est de 5π
- Ca veut dire que $\varepsilon = 5$
- Les définitions peuvent varier d'un facteur 2



- **Théorème de Liouville** : La quantité ε varie comme l'inverse de la quantité de mouvement.
- **Corollaire 1** : l'émittance diminue avec l'accélération.
- **Corollaire 2** : l'émittance n'est jamais nulle (sauf si elle est nulle au départ ce qui supposerait n'accélérer qu'une particule !).
- **Corollaire 3** : la dimension transverse et la divergence d'un faisceau ne sont jamais nulles.
- **Nota**: l'émittance RMS varie si l'optique est non linéaire
- Emittance normalisée: $\varepsilon^* = \beta_L \gamma_L \varepsilon$ ne varie pas avec E

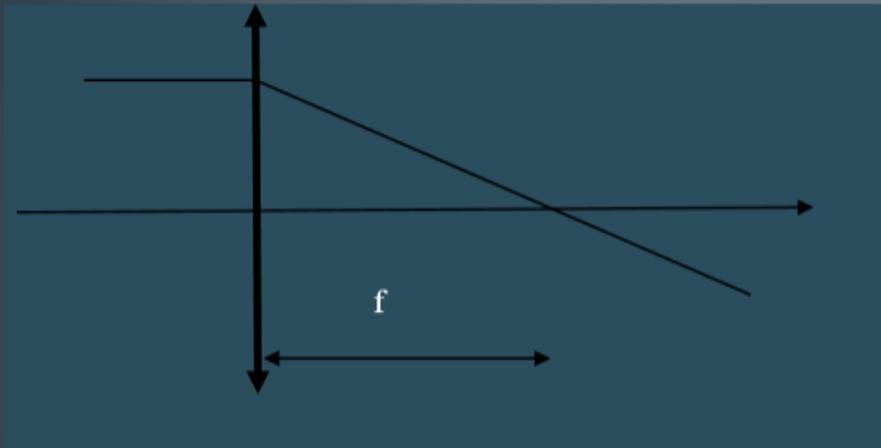
L'émittance RMS peut augmenter dans le cas de non-linéarités ou d'imperfections



Eléments optiques

Optique

- *Définition* : une lentille mince est un élément de longueur nulle qui donne une déviation angulaire proportionnelle à la position sans changer cette dernière.

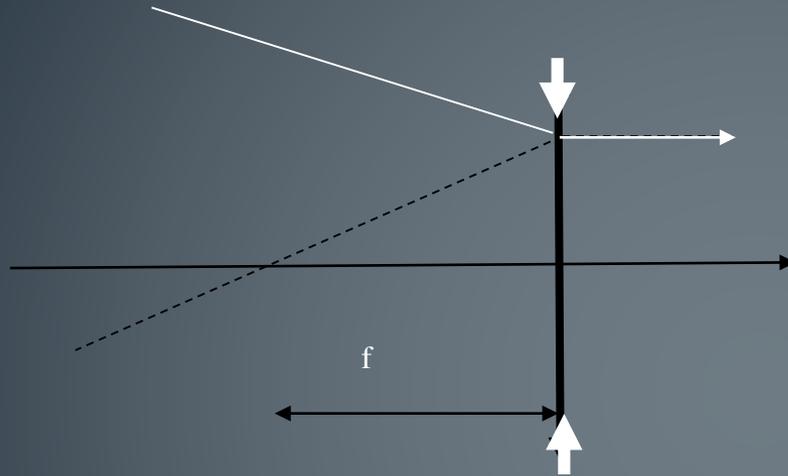


$$x_1 = x_0$$

$$x'_1 = x'_0 - \frac{x_0}{f}$$

- f est la distance focale de la lentille (position de son foyer). On a un signe « moins » quand la lentille est convergente.

Lentille divergente



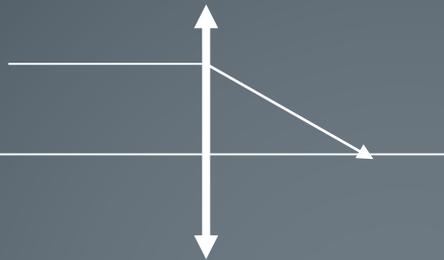
$$x_1 = x_0$$

$$x'_1 = x'_0 + \frac{x_0}{f}$$

- *Propriété* : Deux lentilles minces séparées par un espace sans champ, de même distance focale mais l'une étant divergente et l'autre convergente, forment un ensemble convergent. C'est cette propriété qui expliquera pourquoi une lentille électrostatique est convergente.

Lentille mince + espace de glissement

- Lentille mince



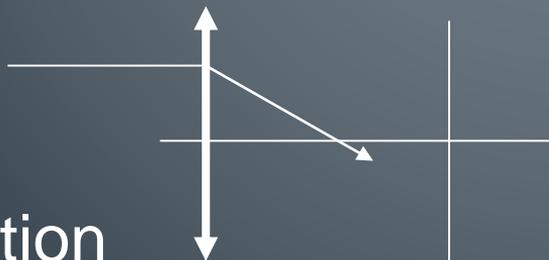
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$$

- Espace de glissement



$$\begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

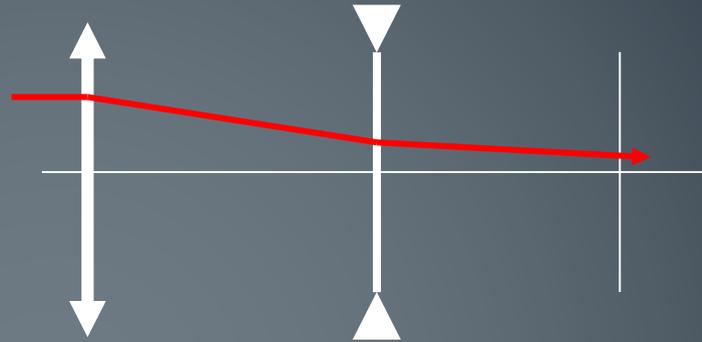
- Association



$$\begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{L}{f} & L \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$$

La maille FODO- focalisation forte

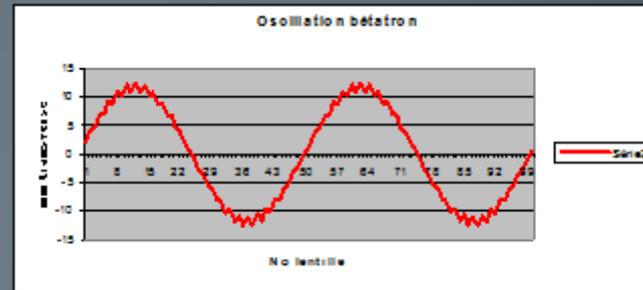
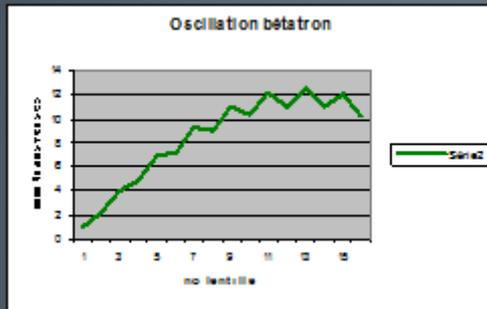
- Adapté aux structures à base quadripolaire
- Association de mailles
 - système périodique
 - Oscillation pseudo-harmonique
 - Pas toujours stable



$$\begin{bmatrix} \frac{f^2 - Lf - L^2}{f^2} & \frac{L(2f + L)}{f} \\ -\frac{L}{f^2} & \frac{f + L}{f} \end{bmatrix}$$

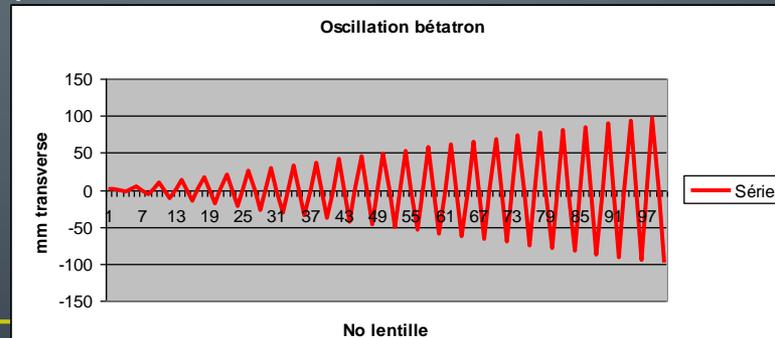
Association de quadripôles. Structure FODO.
Oscillation bétatron. Stabilité. Cf excell

- Qpôle: converge en x \leftrightarrow diverge en y
- Guidage stable \Rightarrow FODO périodique (par exemple)

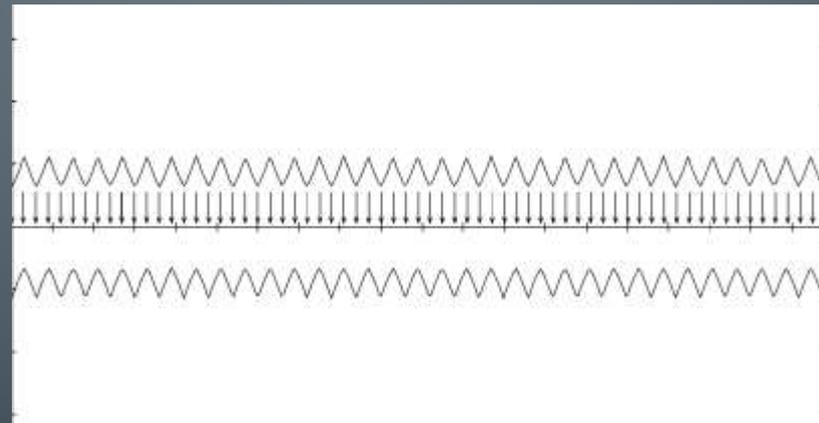
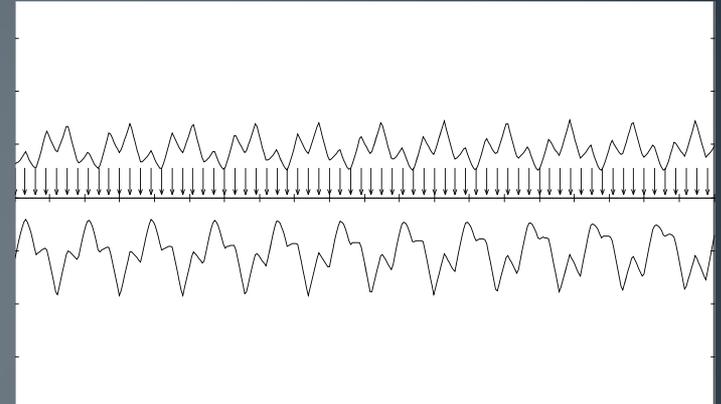
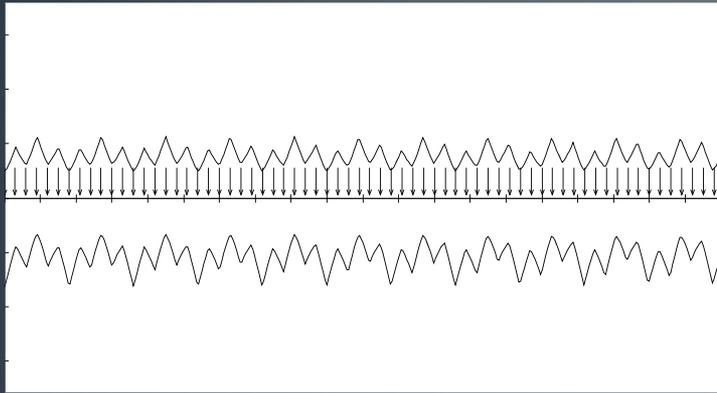


L=distance inter-lentilles

- Oscillation pseudo-harmonique «bétatron »
- FODO stable si $f > L/2$ (cf animation et ci-dessous)



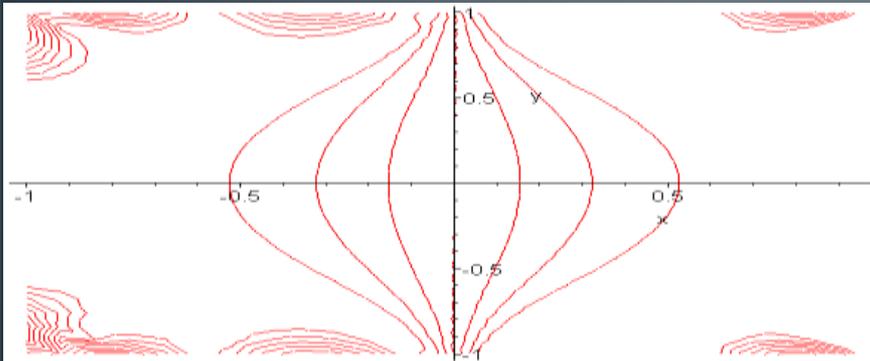
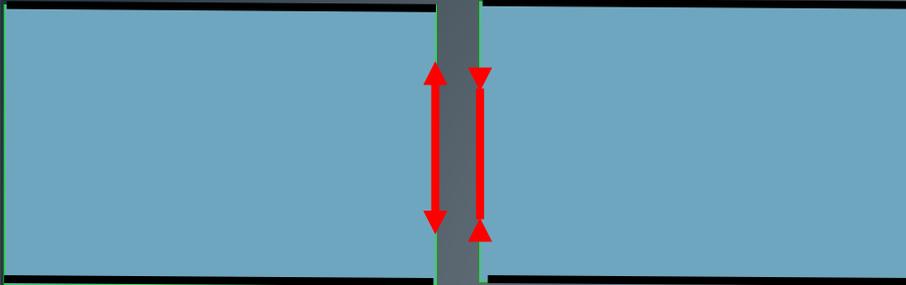
Systeme **périodique**: Adaptation d'émittance ou « matching »: il existe une forme d'émittance qui minimise l'amplitude des oscillations d'enveloppe



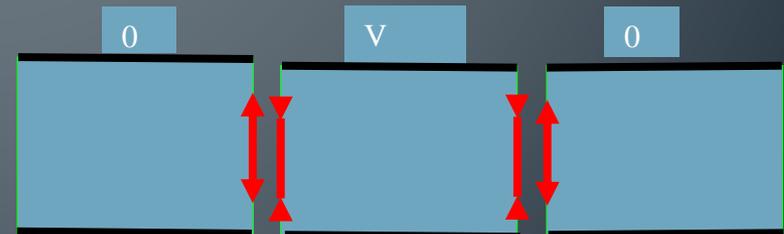
Lentille électrostatique de révolution

V1

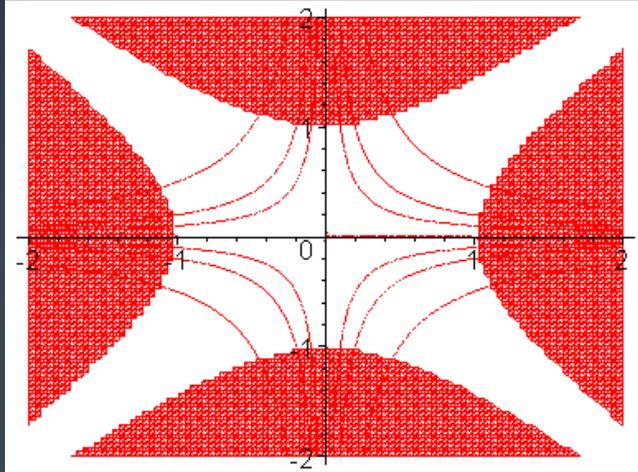
V2



- Convergent dans gap
- Accélératrice ou décélératrice
 - Émittance, ch. Espace
 - +forte si décel.
- Indépendant de n
- Tension $\sim V$ faisceau
- Lent. fente $>$ lentille trou
- Ouverture $\sim R/2$
- Propreté!



Quadripôle électrostatique



- Champ transverse.
- Axe du faisceau perpendiculaire à la feuille.
- Electrodes portées au potentiel $\pm\Delta V$ par rapport à l'axe. Pôles opposés de même polarité.
- Electrodes idéales hyperboliques (dans la pratique: cercles possibles).



$$\left. \begin{aligned} E_x &= \pm \frac{2\Delta V}{R^2} x \\ E_y &= \mp \frac{2\Delta V}{R^2} y \end{aligned} \right\}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{L\Delta V}{R^2V} = \frac{nL\Delta V}{R^2T}$$

n: état de charge
T: énergie cinétique totale (eV)

Quadripôle électrostatique

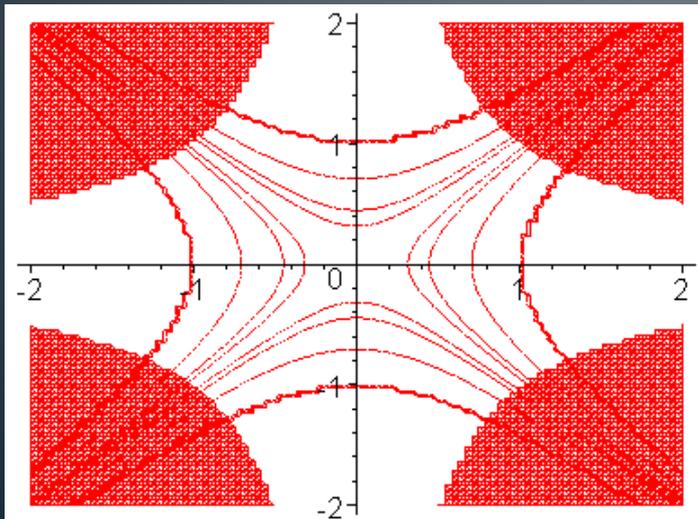
- Electrodes hyperboliques (et infinies) → Force est exactement proportionnelle à la position dans chaque plan.
- Un quadripôle est **convergent** dans une direction et **divergent** dans l'autre.
- → L'association périodique de quadripôles doit donc être alternée (exemple de FODO)
- Symétrie de révolution non préservée
- Equivalent à une lentille mince.
- A distance focale égale, la tension à appliquer varie comme R^2
- Faisceau $1+ / 30$ keV : **100 V** pour ($L=0.2$ m, $R=20$ mm) pour $f=60$ cm
- Longueur efficace $\sim L-R/2$
- Dans la chambre à vide.
- L'ouverture utilisable \sim l'ouverture totale.



Quadripôle magnétique



- B_0 : champ sur le pôle.
- R : rayon interne (dit « de gorge »)
- $g = B_0/R$ est le gradient
- Pôles idéaux hyperboliques
- Il peut être placé à l'extérieur de la chambre à vide.
- Force magnétique plus grande que la force électrique quand E croît,
➔ quadripôles magnétiques dans les grandes machines
- B_0 est une limite mais g aussi (saturation ailleurs que sur le pôle)



$$\left. \begin{aligned} B_x &= gy \\ B_y &= gx \end{aligned} \right\}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{B_0 L}{R(B\rho)} = \frac{gL}{(B\rho)}$$

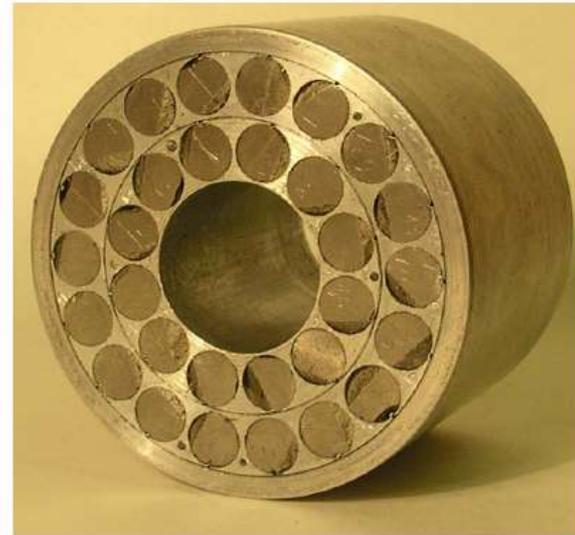
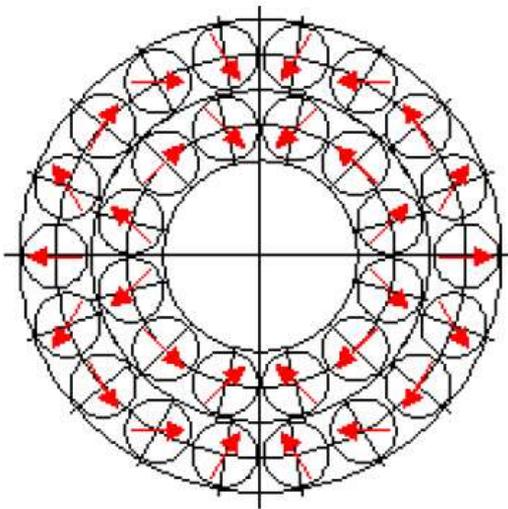
Quadripôle à aimants permanents (CERN et HIPPI collaboration)



Permanent Magnet Quadrupoles



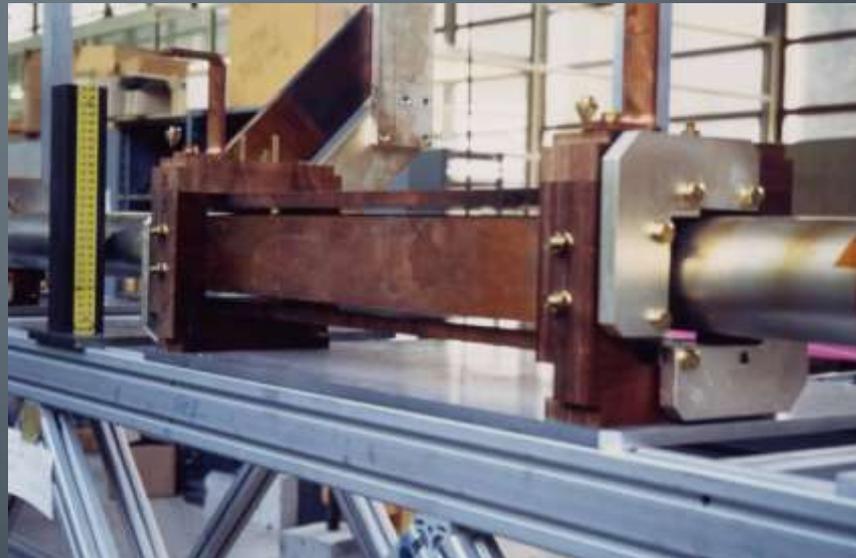
- ITEP Prototype PMQ designed for 50 T/m
 - Inner layer: 12 rods of SmCo_5
 - Outer layer: 18 rods of SmCo_5



Stefan Ramberger, AB-RF-LR, CERN, 1211 Geneva 23

Divers

- Un **quadripôle** est **équivalent**, avec une grande précision, à une **lentille mince** entourée de deux espaces sans champ de longueur $L/2$ (la longueur totale ne doit bien sûr pas changer).
- Un **doublet** de quadripôles est très **différent** d'une **lentille mince**. Il est en fait équivalent à une lentille épaisse et, qui plus est, décalée.
- Un **triplet symétrique** de quadripôles est également équivalent à une **lentille mince**.
- Un quadripôle sera d'autant meilleur que son **GRADIENT de CHAMP sera constant** (ou que son champ variera **LINEAIREMENT** avec la position latérale)
- Un Qpôle original

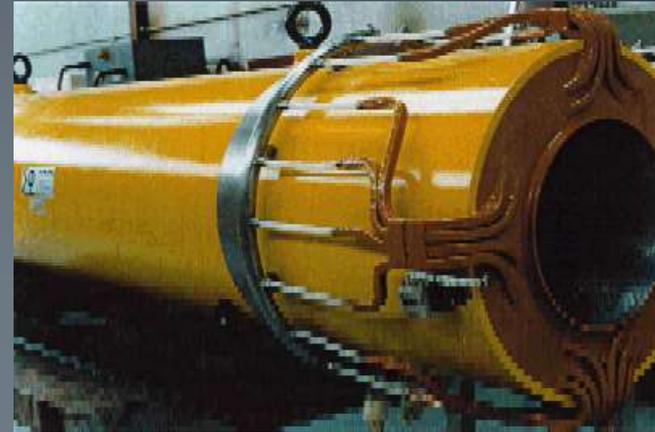


Question

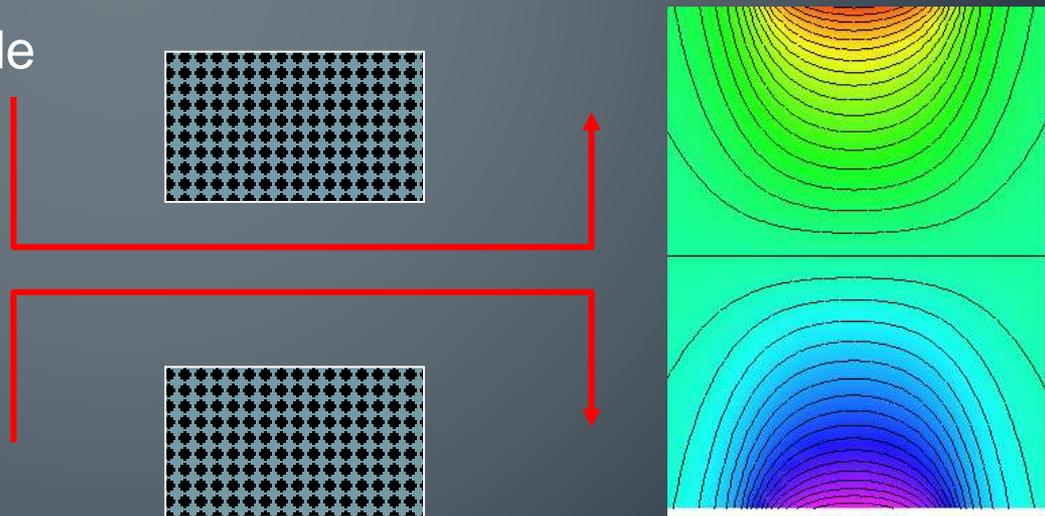
- Un quadrupôle parfait est-il parfait?

Le solénoïde (lentille Glaser)

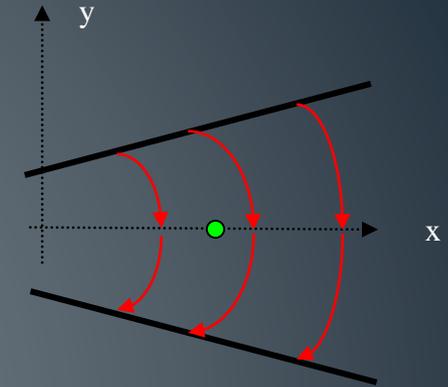
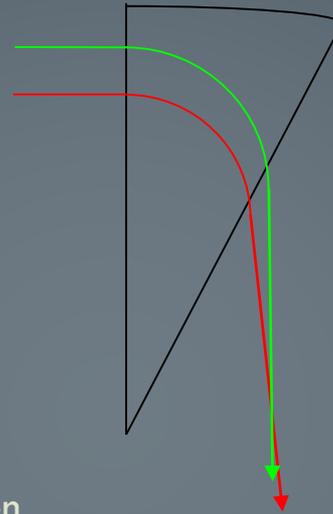
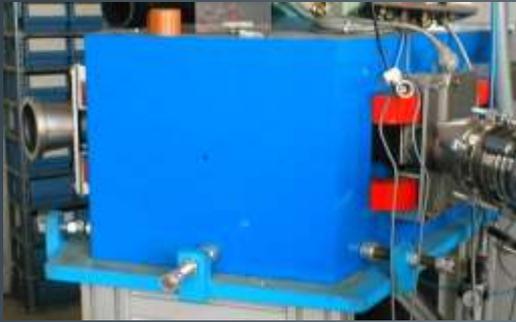
- Focalisation par les faces
- Peu d'aberrations
- Convergent
- Symétrie de révolution, mais couplage des plans → lentilles **contra-rotatives** si besoin
- similaire à une lentille mince entourée de deux espaces de glissement



$$B_s \approx B_0 \left(1 + \frac{s^2}{a^2} \right)^{-1}$$
$$\frac{1}{f} = \frac{\pi a B_0^2}{8(B\rho)^2}$$



Déviatation des particules



- Ici: focalisant dans le plan de déviation
- **Indice** : composante horizontale non nulle en dehors du plan médian, donc un effet dans le plan vertical
- indice nul → la trajectoire dans le plan vertical est celle dans un espace sans champ.
- indice non nul → effet focalisant ou défocalisant, selon le signe de l'indice, dans le plan qui n'est pas celui de déviation. Il subsiste un effet focalisant dans le plan de déviation mais amoindri voire défocalisant si $n > 1$

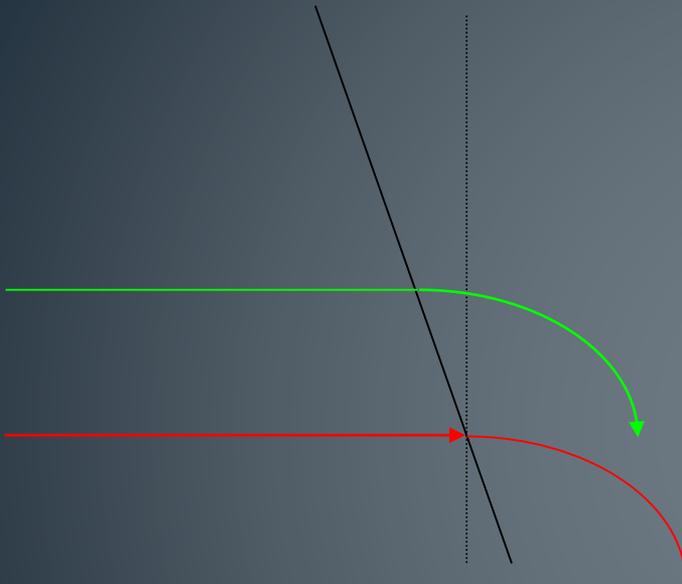
$$R = \frac{(B\rho)}{B}$$

$$n = -\frac{R}{B} \frac{\partial B_x}{\partial y} = -\frac{R}{B} \frac{\partial B_y}{\partial x}$$

$$B_y = B_0 \left[1 - n \frac{x}{R} \right]$$

$$B_x = -B_0 n \frac{y}{R}$$

Focalisation par les faces (simplifiée)

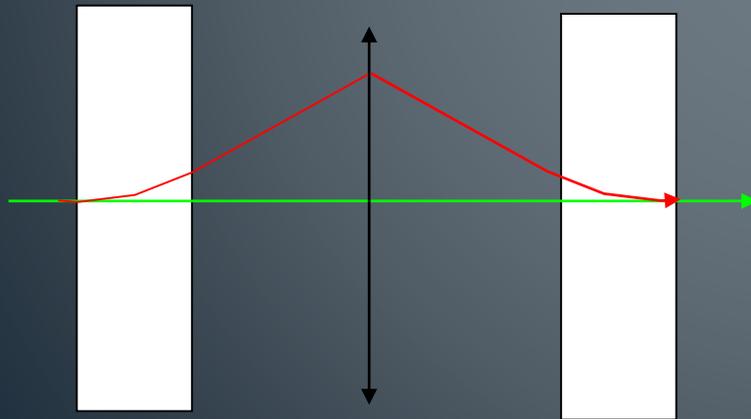
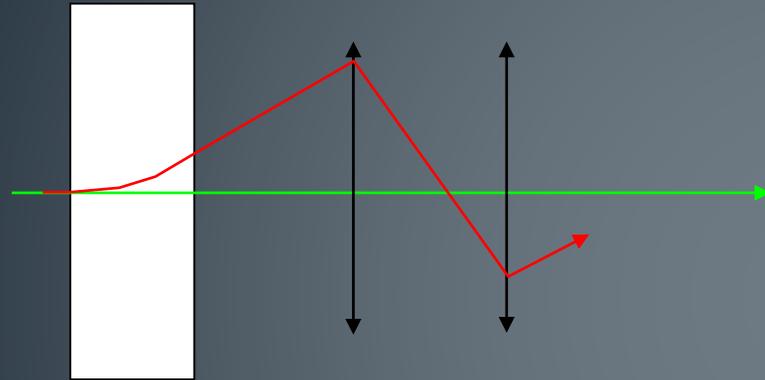


$$\left| \frac{1}{f} \right| = \frac{\tan(\phi)}{R}$$

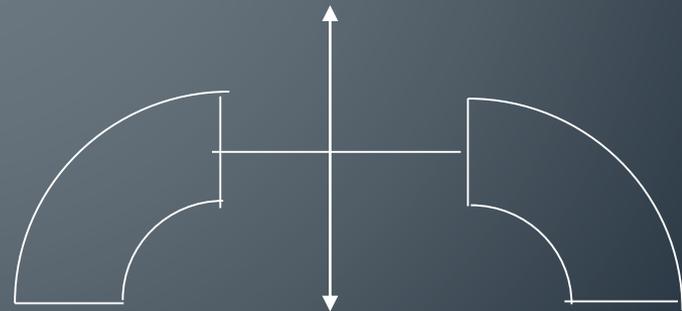
- ~ lentille mince, convergente ou divergente
- effet de face focalisant dans le plan de déviation → effet défocalisant dans l'autre plan
- *Propriété* : Si l'angle d'entrée est égal à celui de sortie et égal au quart de l'angle de déviation alors le dipôle est convergent identiquement dans les deux plans.
- *Remarque* : un dipôle n'a pas obligatoirement la forme d'un secteur d'angle égal à celui de déviation
- *Nota* : nous avons totalement négligé l'effet des champs de fuite.

Séparation et dispersion

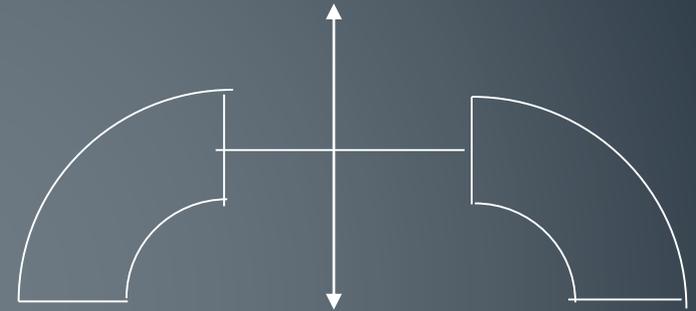
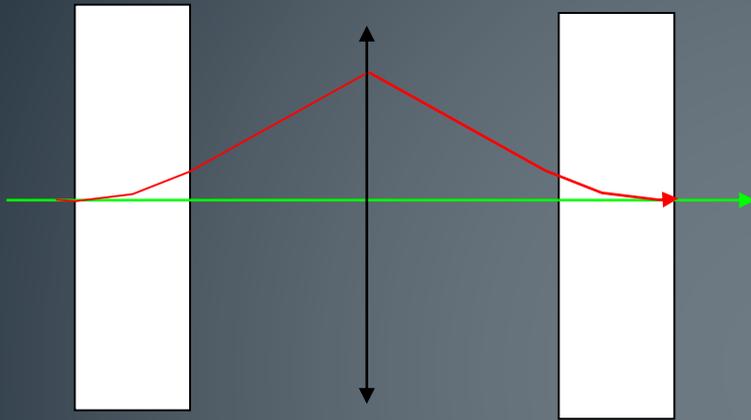
$$x(s) = x_0(s) + D(s) \frac{\Delta p}{p_0}$$



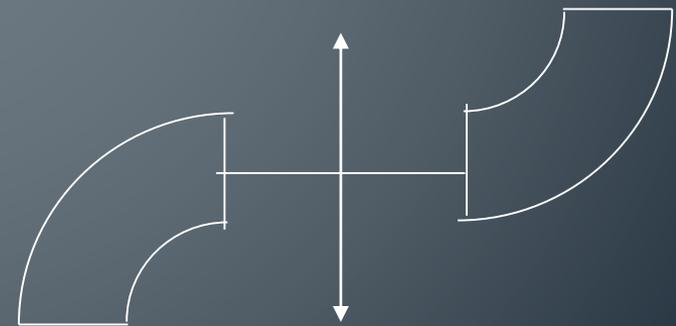
- séparation dans un champ magnétique si q/mv sont différents.
- séparation dans un champ électrique si et seulement si q/T sont différents.
- Spectromètre de masse: peut combiner les deux
- Fonction de dispersion
- Achromatisme



Exercice! Chicane achromatique



?



Application: déviation finale d'un accélérateur de radiothérapie

Dipôle simple:
aucun intérêt

270 degrés
achromatique en un
point →

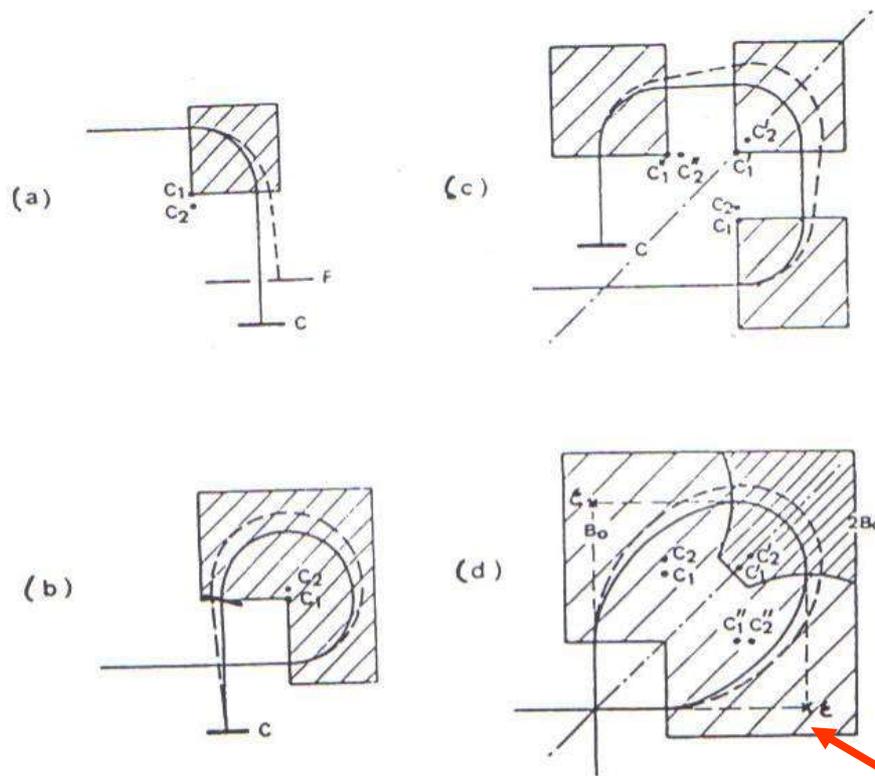
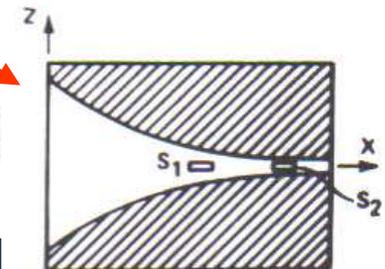


FIGURE 3.27 Beam bending magnetic systems: (a) — 90° magnet, (b) — triplefocal 270° magnet, (c) — multisectional 270° magnet, (d) — Pretzel-type 270° magnet (achromatic magnetic mirror)

Vrai achromat
→ complexe
→ CLINAC 18
(Varian)

Pretzel

MAGNET POLES



Machines circulaires

Cyclotron

Focalisation: comme chacun sait, les accélérateurs circulaires ne fonctionnent pas

En 1924, **Flegler**, de l'université d'Aix-la-Chapelle, propose de faire tourner les ions dans un champ magnétique. **Wideröe** lui réplique qu' » *il serait très difficile de stabiliser les orbites circulaires* » , comme il l'avait exposé dans sa thèse.

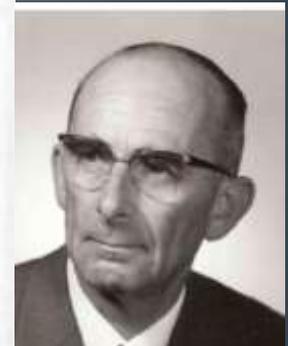
C'est ainsi qu'on tue une idée géniale.



Flegler



Wideröe

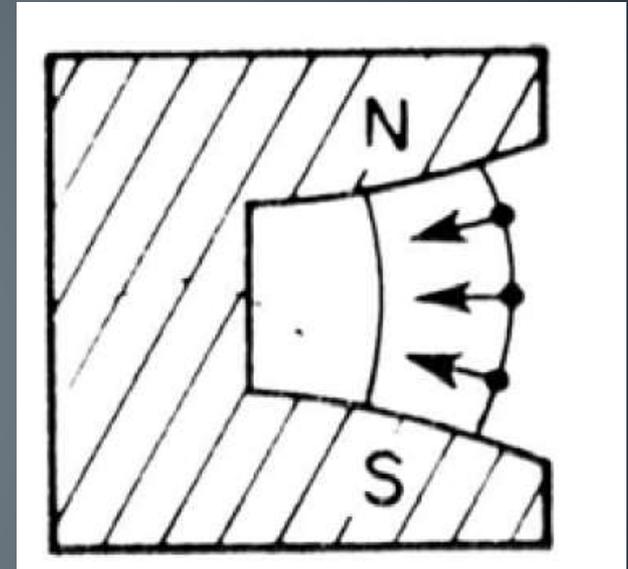


Ecole IN2P3 : accélérateurs
La Lande Les Maures, Novembre 2007

Eric Baron 15

Focalisation faible

- Le champ magnétique n'est pas uniforme en bord de pôle
- Effet de focalisation ou de défocalisation
- Focalisation H et V si l'indice de champ est modéré (inférieur à 1)
- Adapté aux cyclotrons
- Grande chambres à vide, grosse machines, coût, pour les synchrotrons
- SATURNE1 à Saclay



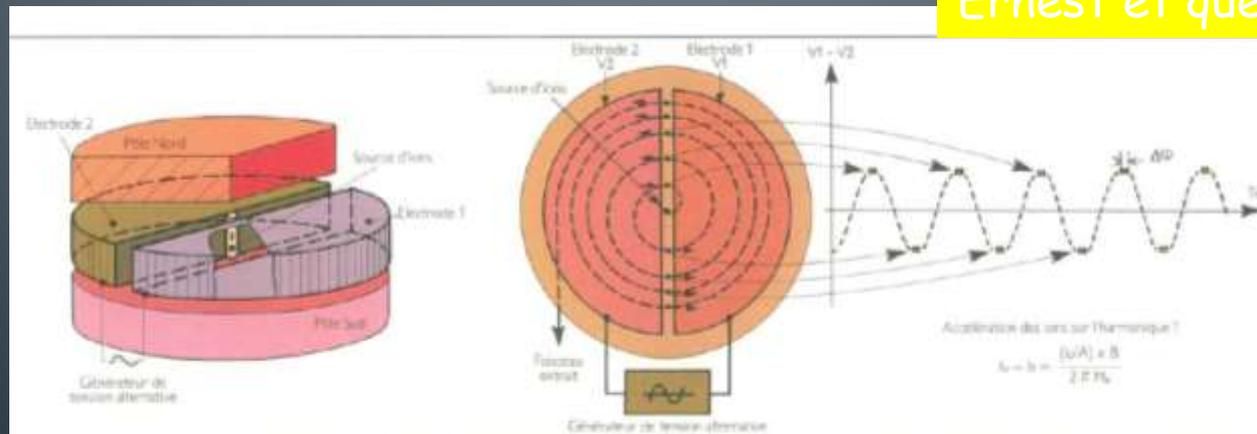
$$n = - \frac{R}{B} \frac{\partial B}{\partial R}$$

Cyclotrons

- Le cyclotron assure
 - Focalisation
 - Isochronisme
- Limité à 20 MeV en version « naïve »



Ernest et quelques amis

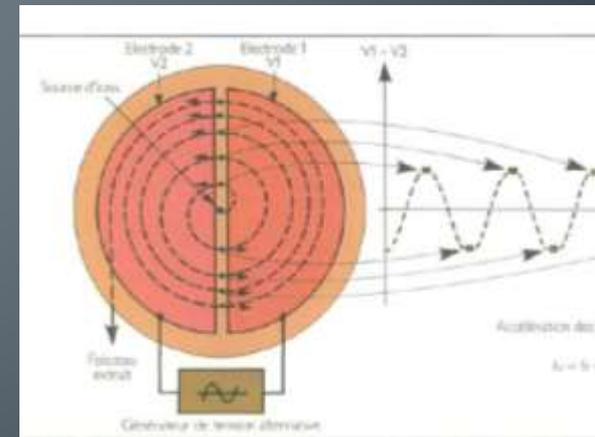


Dynamique dans un cyclotron

- Fréquence cyclotron (de révolution)
- Machine basse énergie (cinétique versus totale)
- En non relativiste, on obtient le pas de spiralisation
- La machine peut avoir en fait jusqu'à 4 cavités accélératrices
- Fonctionnement en « harmonique n » multiple de la fréquence cyclotron
- f_c indépendant de la vitesse et du rayon

$$\rho = \frac{v}{2\pi f_c} = \frac{mv}{qB} \Rightarrow f_c = \frac{qB}{2\pi m}$$

$$\rho = \frac{mv}{qB} \propto \sqrt{T} \Rightarrow \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta T_{tour}}{T}$$



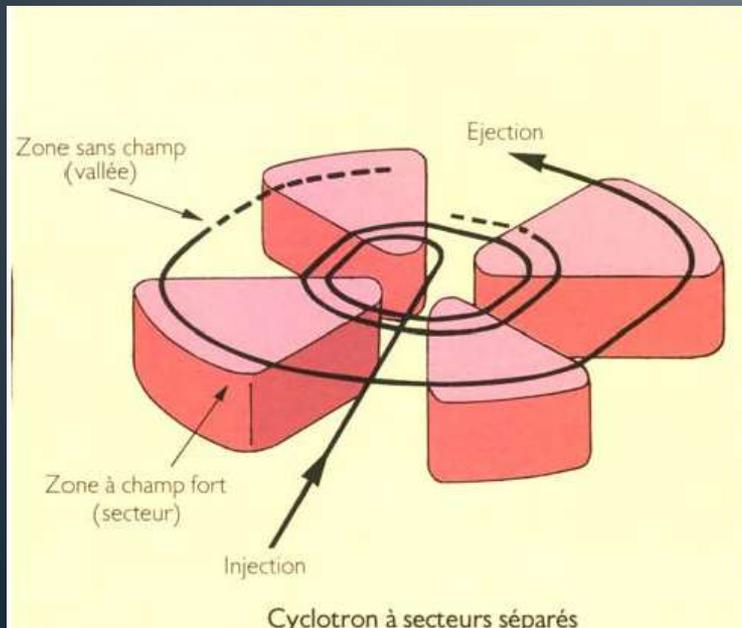
Le K d'un cyclotron

- L'énergie cinétique de sortie, par nucléon, est proportionnelle au carré de la charge par nucléon des particules accélérées, uniquement

$$B\rho = \frac{mv}{q} \Rightarrow T = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{q^2}{2m}(B\rho)^2$$
$$\frac{T_{\max}}{A} = \left(\frac{q}{A}\right)^2 \frac{(B\rho)_{\max}^2}{2m_{\text{nucl}}} \equiv K \left(\frac{q}{A}\right)^2$$
$$T_{\text{MeV}/A} \approx 48(B\rho)_{\max}^2 \left(\frac{q}{A}\right)^2$$

Cyclotron à secteurs séparés

- Résout les aspects isochronisme (dont les effets relativistes)
- Assure la focalisation via les faces



E Baron

Equipement: le cyclotron IBA



$E_{\max} = 235 \text{ MeV}$

$I_{\max} = 500 \text{ nA}$

220 tonnes

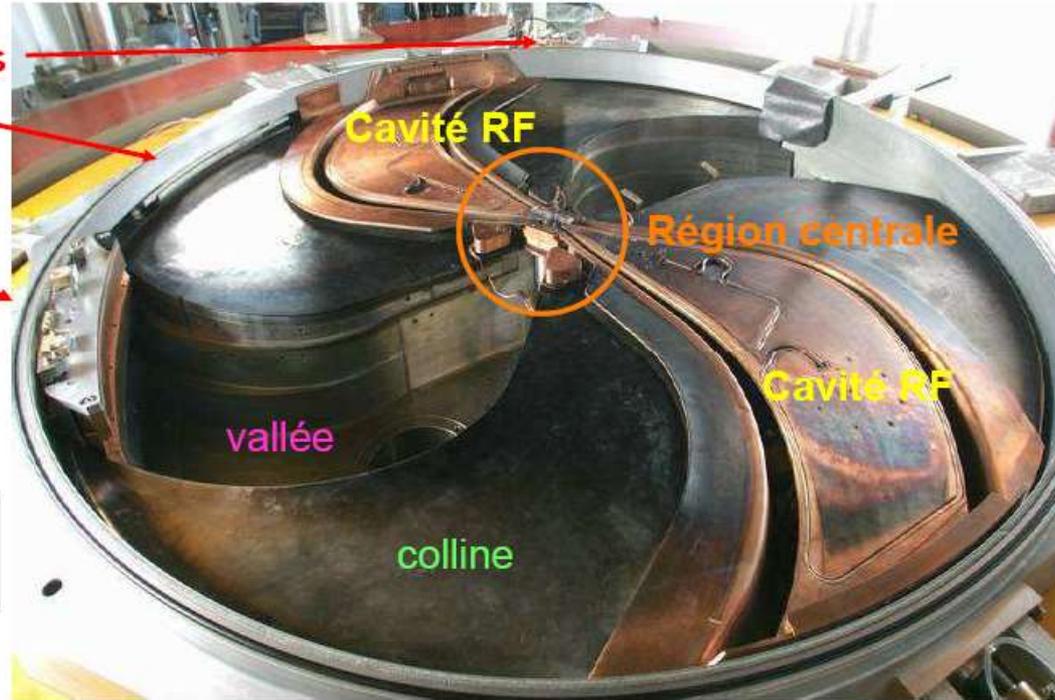
4 secteurs – 2 cavités RF à 106.157 MHz

champ moyen à l'extraction 2.188 T

Le cyclotron: le plan median

Système d'extraction:

- quadrupoles permanents
- correcteur de gradient
- défecteur

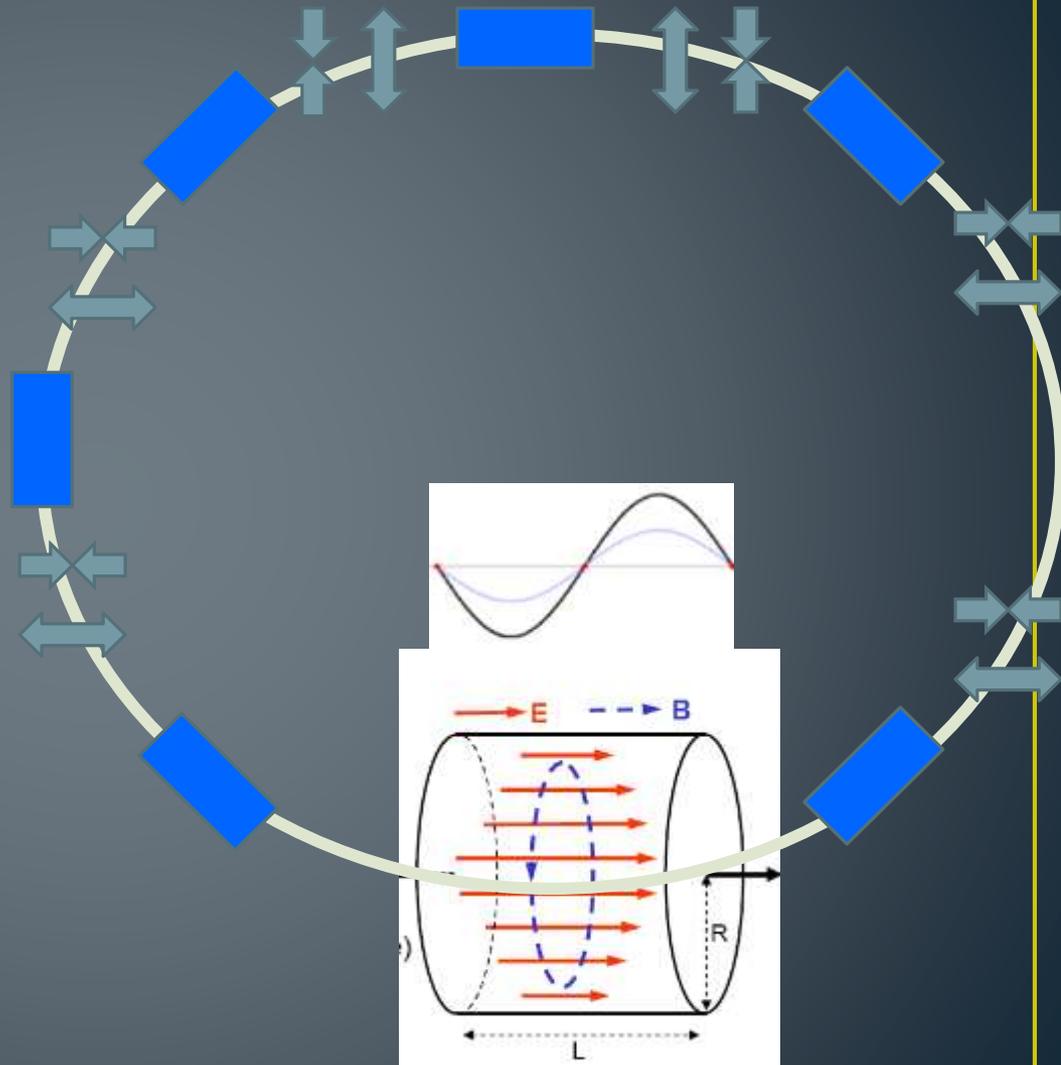


4 vallées
4 collines

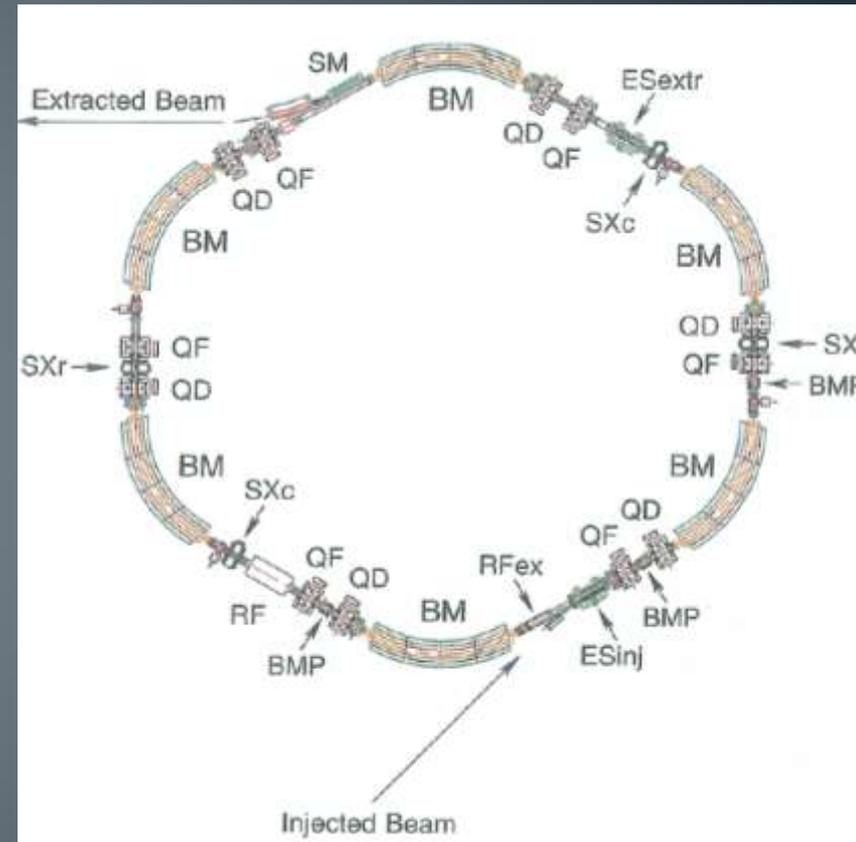
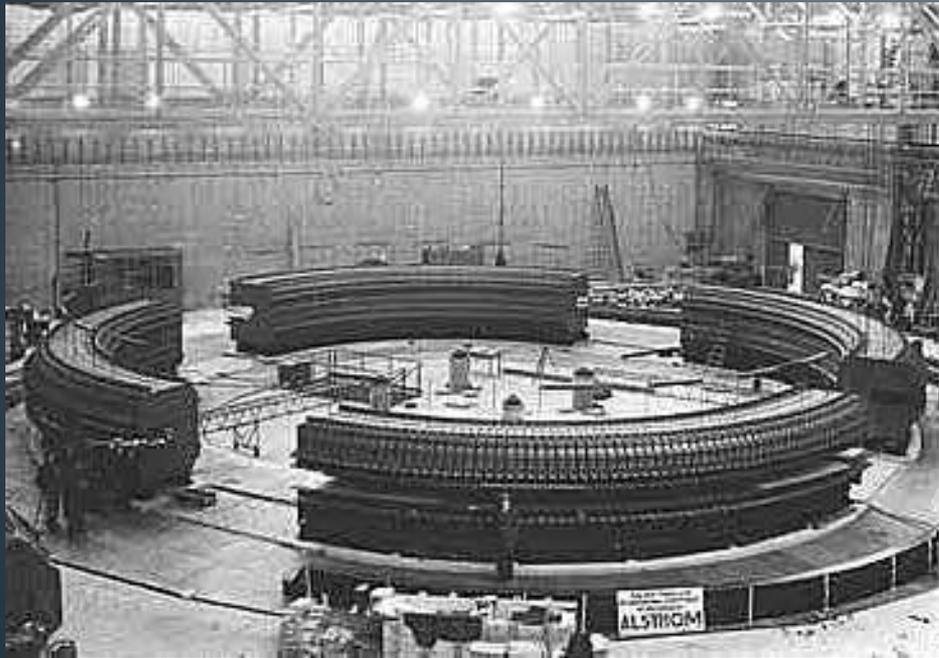
Synchrotron

Le synchrotron **PAR** les nuls

- Accélération et/ou stockage: champs variables ou fixes
- Guidage et focalisation achromatique
- Cavités pour augmenter l'énergie ou la maintenir (rayonnement synchrotron)
- Particules synchrones de la RF: fréquence fixe ou variable (électrons vs ions)



Les synchrotrons



• Saturne1 (focalisation faible)

• HICAT (Hadronthérapie par faisceau carbone, Heidelberg)

HIT: les sources d'ion, le linac



prot.-synchrotron, Shizuoka, Japan



Rayonnement synchrotron

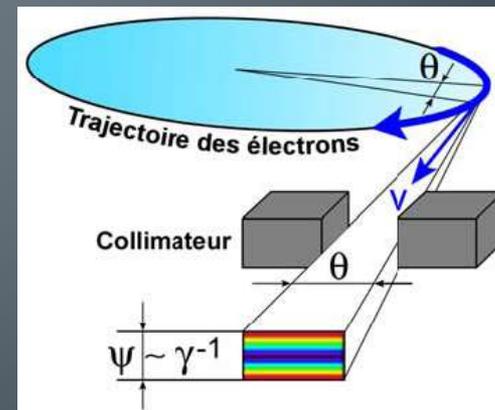
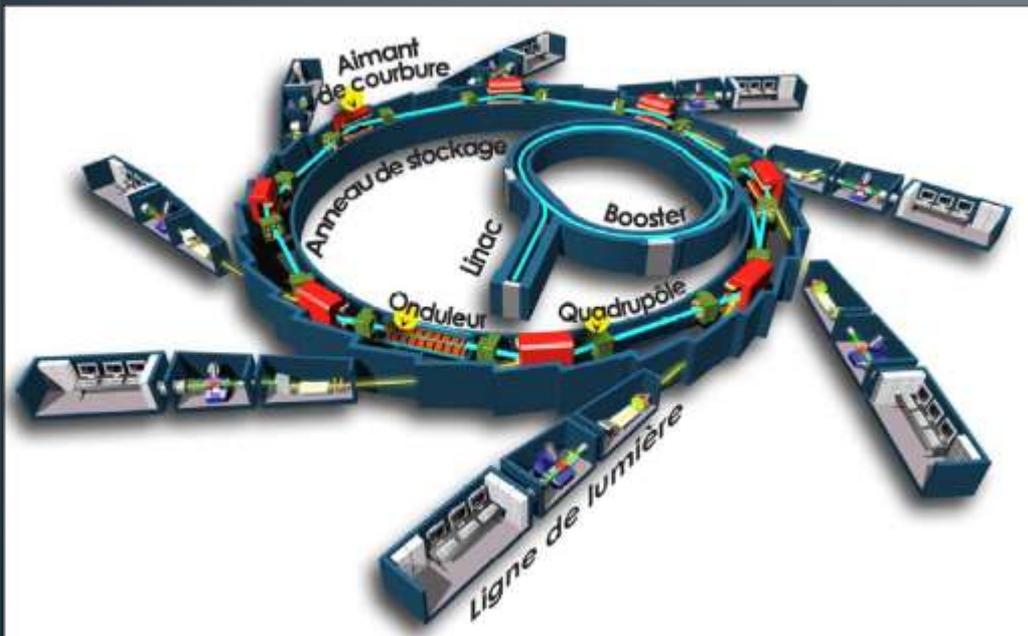
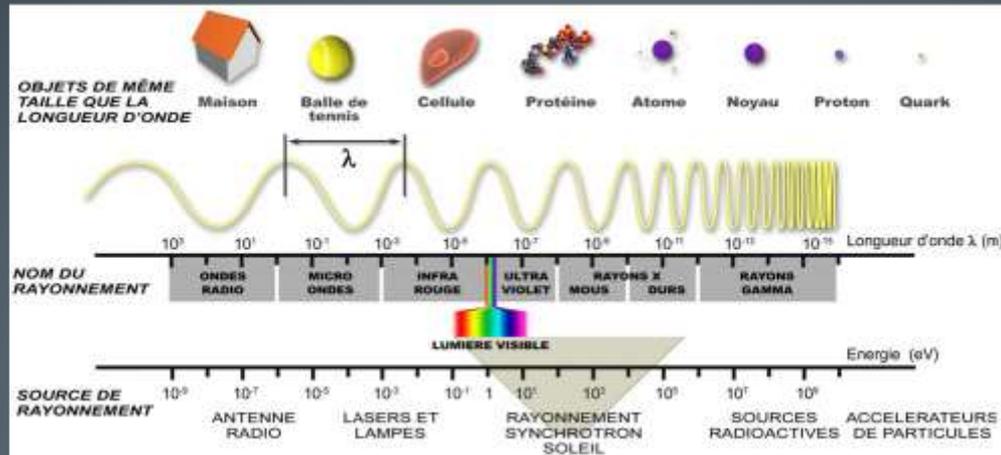
- Le rayonnement synchrotron: rayonnement électromagnétique émis par des particules chargées et déviées
- En $E^4/m^4 \rightarrow$ électrons
- Nuisance ou opportunité?

Quelques exemples de perte d'énergie par rayonnement synchrotron

$$U_0(\text{keV}) = 88,5 \frac{E^4(\text{GeV})}{\rho(\text{m})}$$

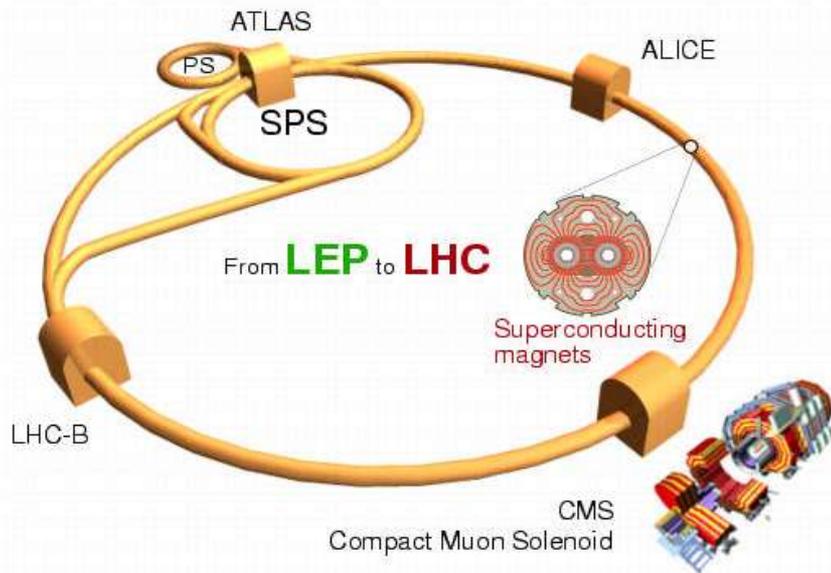
	Circonférence de l'anneau en m	Energie E de la machine en GeV et en keV	Rayon de courbure ρ en m	Energie U_0 perdue par tour en keV
Super-ACO (Orsay)	72	0,8 GeV = $0,8 \cdot 10^6$ keV	1,70	21,3
SOLEIL (Saclay)	354	2,75 GeV = $2,75 \cdot 10^6$ keV	5,36	944
ESRF (Grenoble)	844	6 GeV = $6 \cdot 10^6$ keV	23,40	$4,9 \cdot 10^3$
LEP (CERN – Genève)	$27 \cdot 10^3$	70 GeV = $70 \cdot 10^6$ keV	3000	$7,08 \cdot 10^5$

Machines à lumière synchrotron: des microscopes



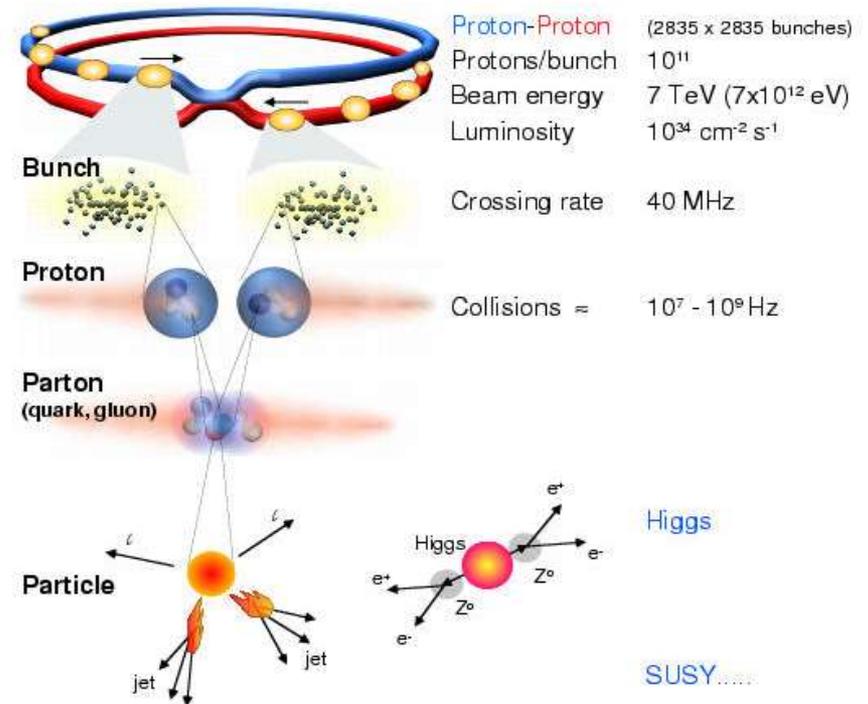
Collisionneurs: synchrotrons et anneaux de stockage

The Large Hadron Collider (LHC)



	Beams	Energy	Luminosity
LEP	e ⁺ e ⁻	200 GeV	10 ³² cm ⁻² s ⁻¹
LHC	p p Pb Pb	14 TeV 1312 TeV	10 ³⁴ 10 ²⁷

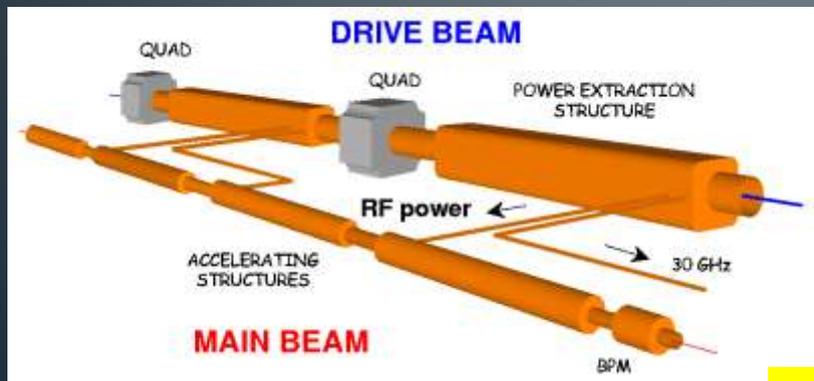
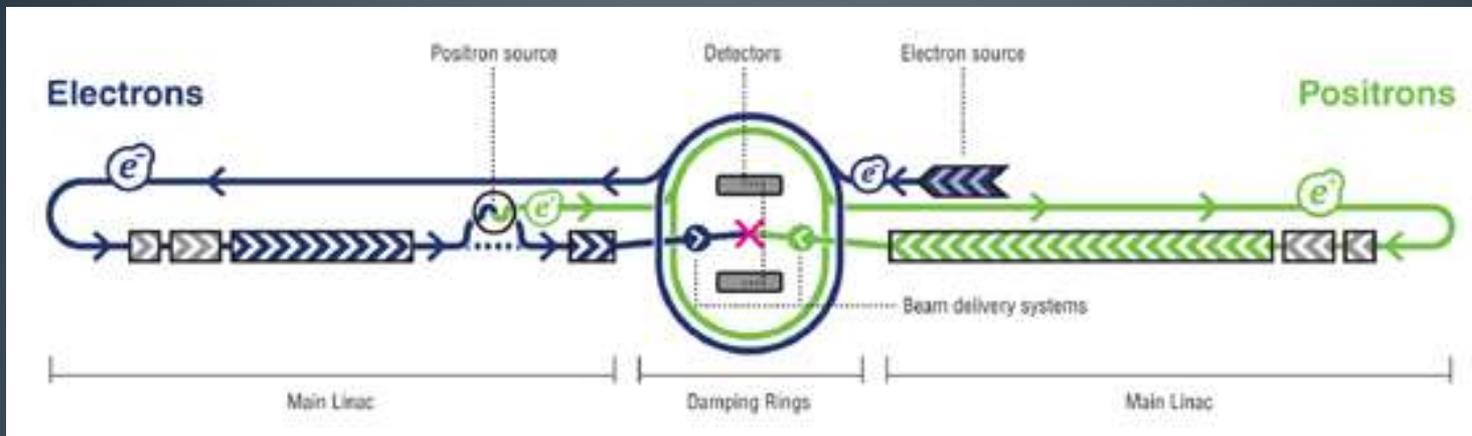
Collisions at LHC



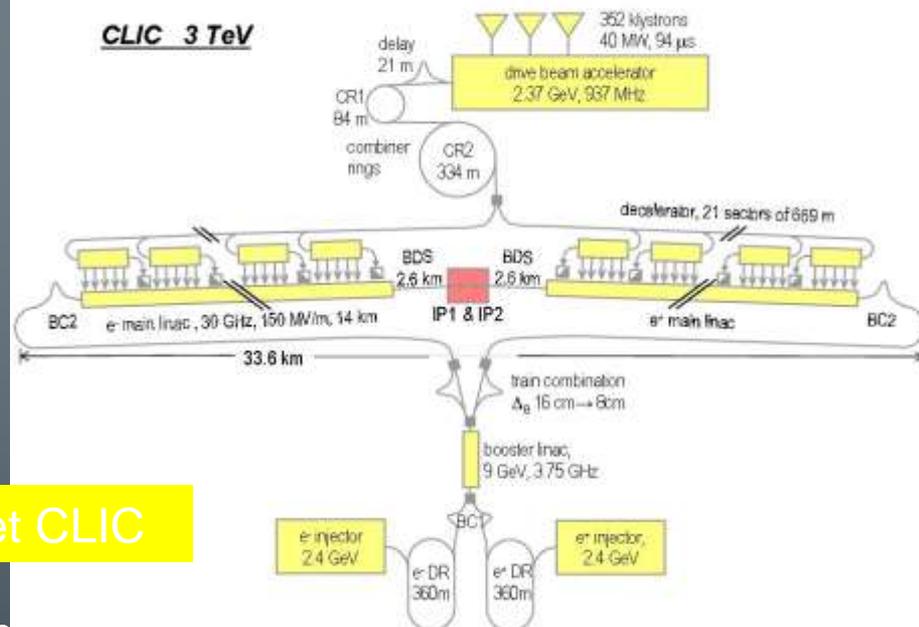
Selection of 1 in 10,000,000,000,000

Collisionneurs linéaires e^+/e^- : au-delà du LHC

Les machines circulaires deviennent inutilisables



ILC et CLIC



Diagnostics (P Ausset)

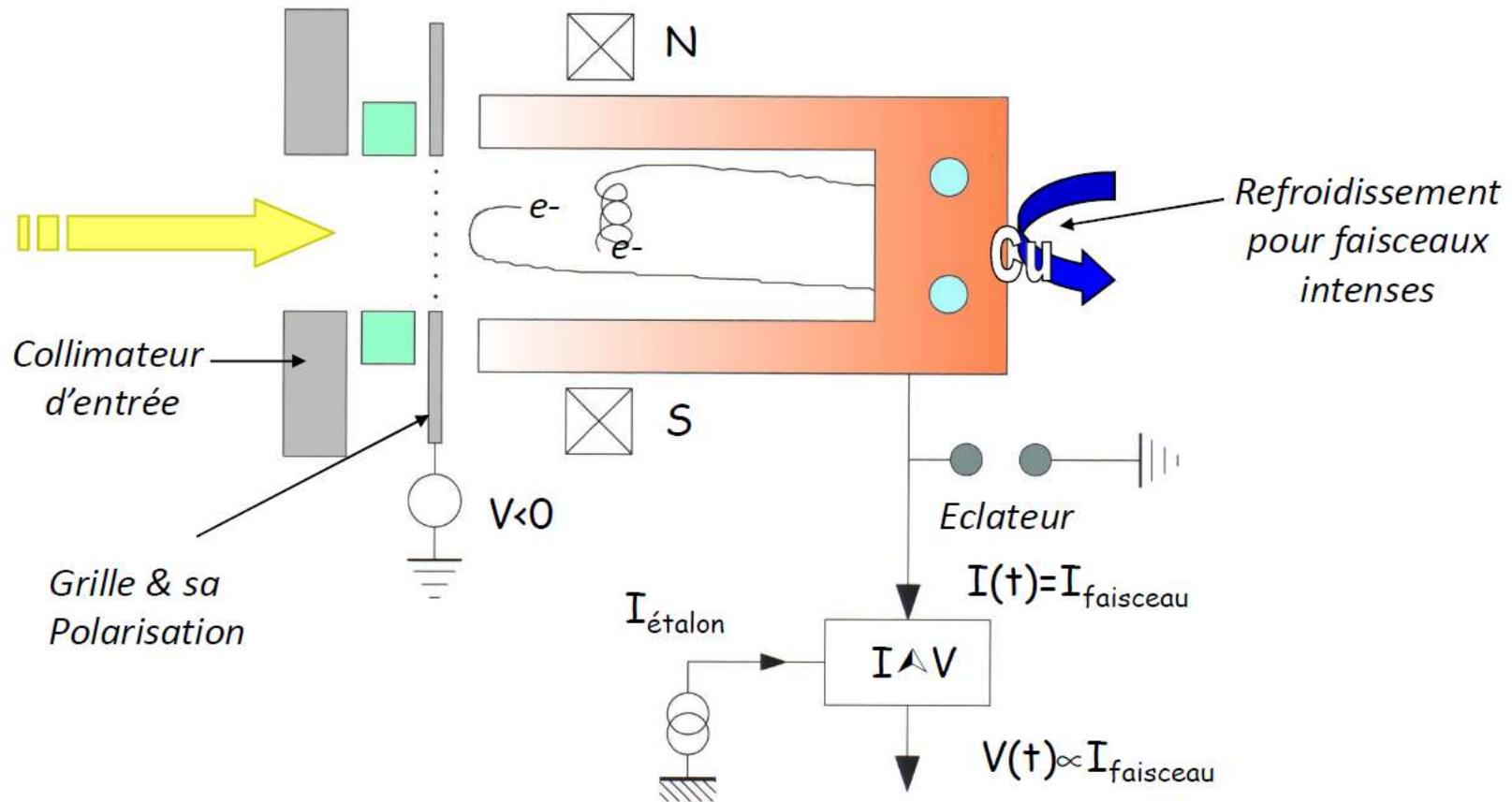
Quelques exemples

Intensité

Profil

Emittance

Coupe de Faraday: intensité



Exemples de Réalisation

Les cages de Faraday pour forts faisceaux

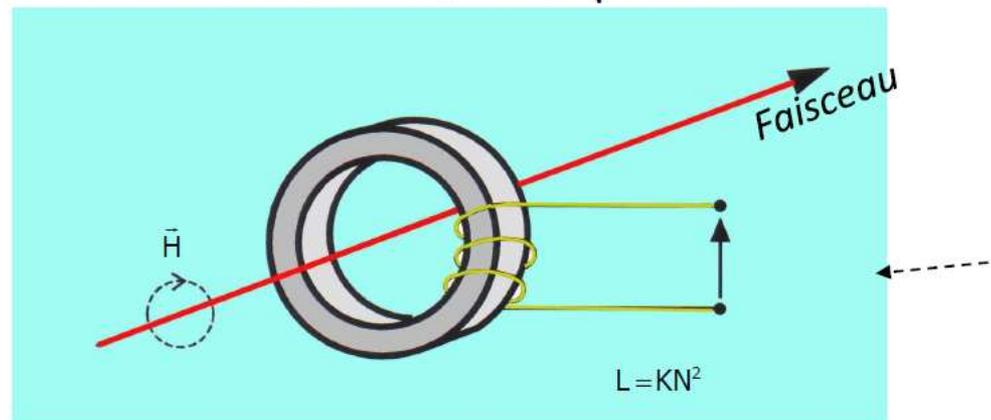


Cage de Faraday et bloc d'arrêt de 25 KW. Linac de GSI. (Bride 150 mm²)

Transformateur d'intensité

Propriétés:

- Utilise le champ H associé au faisceau
- Non destructif du faisceau
- Moniteur absolu.
- Large bande passante possible: $\sim 1 \text{ GHz}$
- Utilisable pour toutes les particules accélérées chargées
- Nombreuses réalisations commerciales disponibles



Mesure de courant par électrode capacitive

- Non interceptif.
- Moniteur fonctionnant pour toutes les natures de faisceau.
- Nécessite en pratique un étalonnage.
- Utilise le champ électrique associé au faisceau.
- Destinée aux machines à protons (longueur du bunch \gg longueur de l'électrode)
- Contrôle de la forme des bunches, mesure de la phase faisceau / R.F.

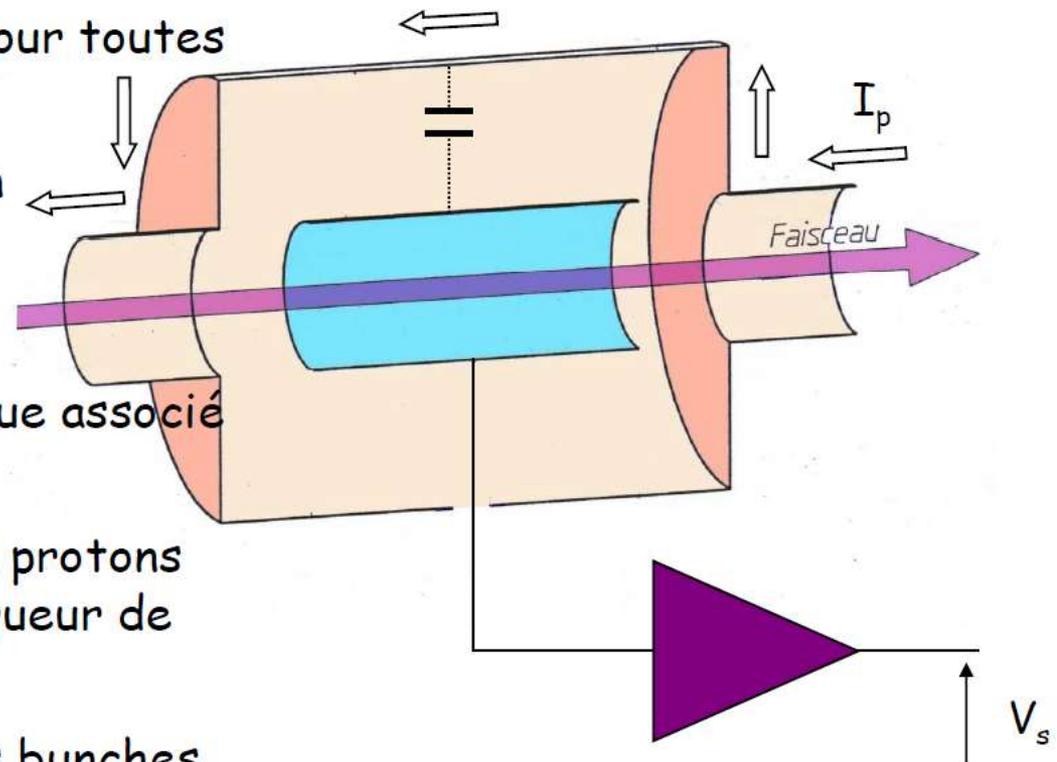


Schéma de principe d'une P.U. capacitive

Détection de position (pick up)

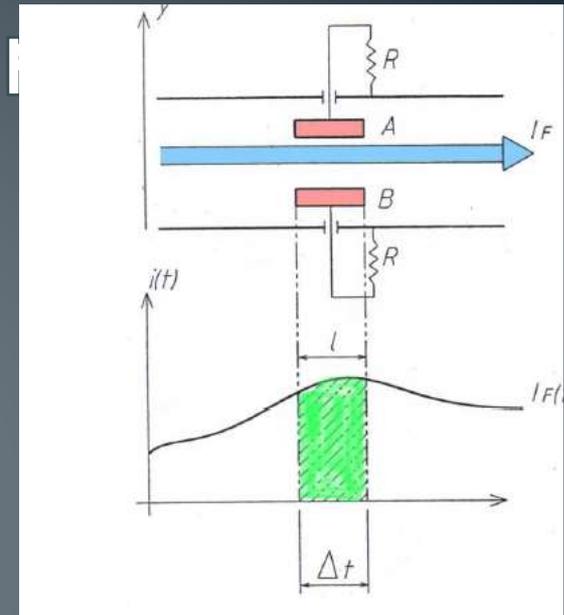
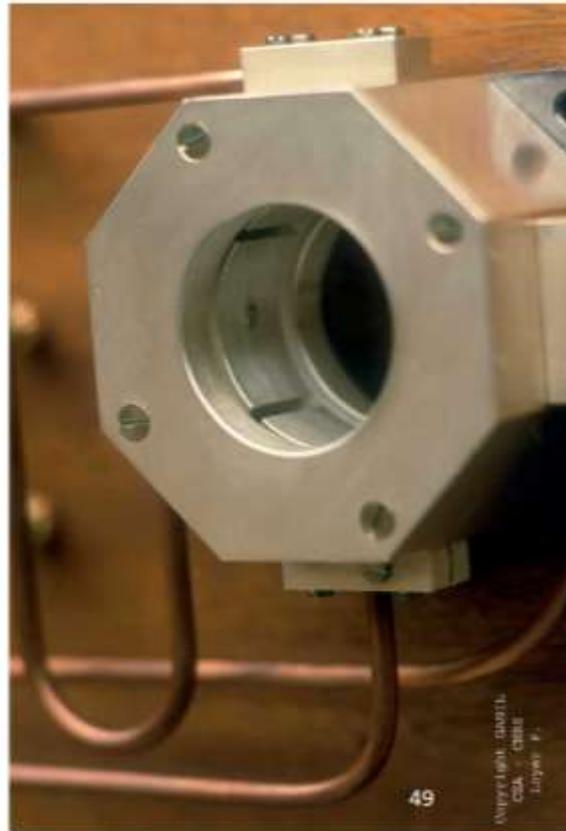


Sonde de Position Capacitive

Utilisation : mesure de la position du centre de gravité du faisceau d'ions dans le canal d'injection du cyclotron injecteur

Principe : détection synchrone sur l'harmonique 2 de la structure HF du faisceau (fréquence intermédiaire à 10kHz) puis extraction de la position du faisceau par transformation de la différence d'amplitude des signaux en différence de phase.

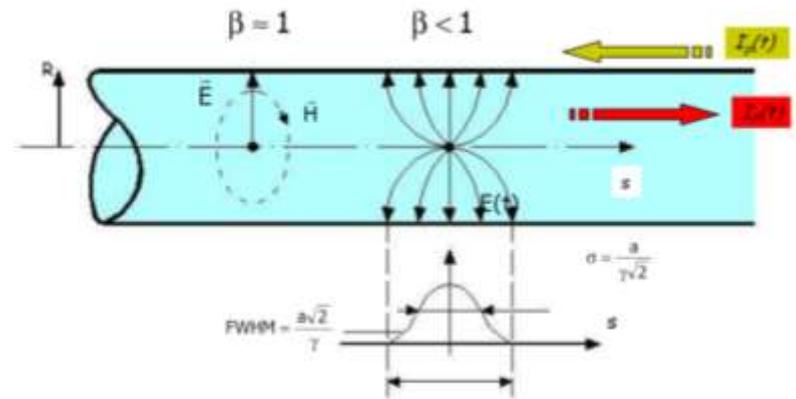
Performances : pour 10nAe à 30keV/u
- ouverture : 30mm
- résolution : 0,1mm (intégration 1s)
- précision absolue : 0,5mm au voisinage du centre ($<R/3$)



- Non interceptif.
- Moniteur fonctionnant pour toutes les natures de faisceau.
- Utilise le champ électrique associé au faisceau.
- Destinée aux machines à protons (longueur du bunch \gg longueur de l'électrode)

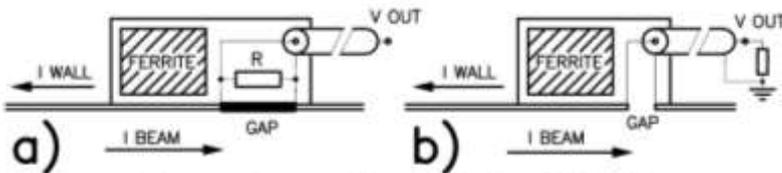
Position et intensité Current wall monitor

CHAMP ELECTROMAGNETIQUE ASSOCIE AU FAISCEAU

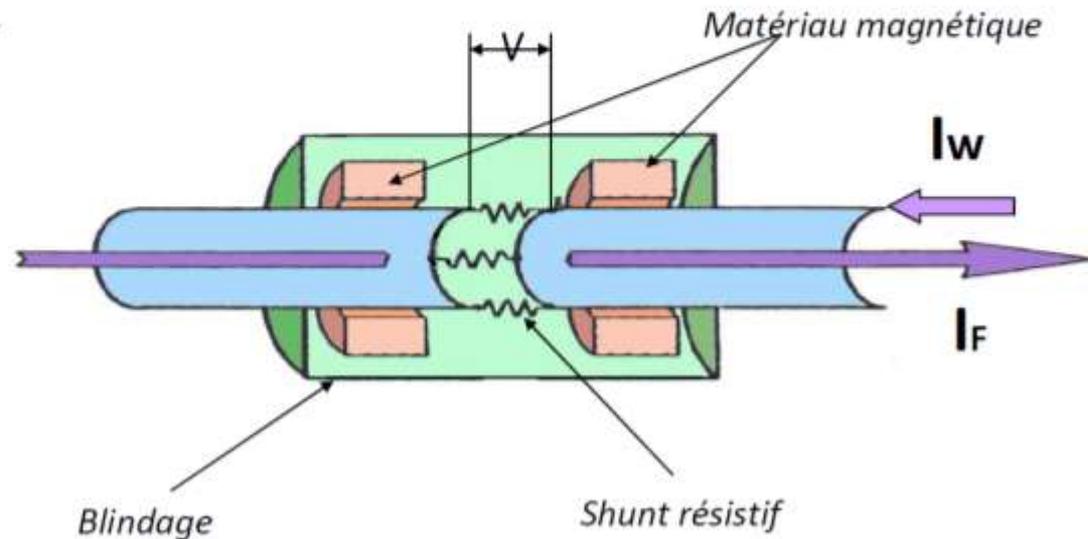
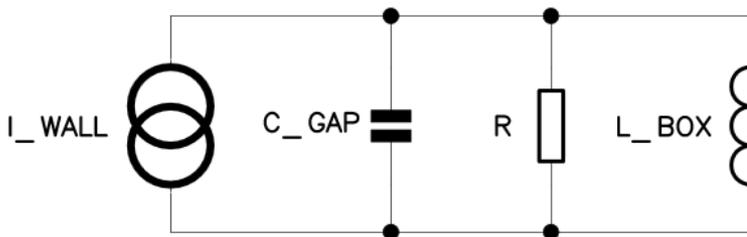


Propriétés:

- Utilise le courant de paroi.
- Non destructif du faisceau
- Large bande passante possible: plusieurs GHz.
- Possibilité d'obtenir la position du faisceau



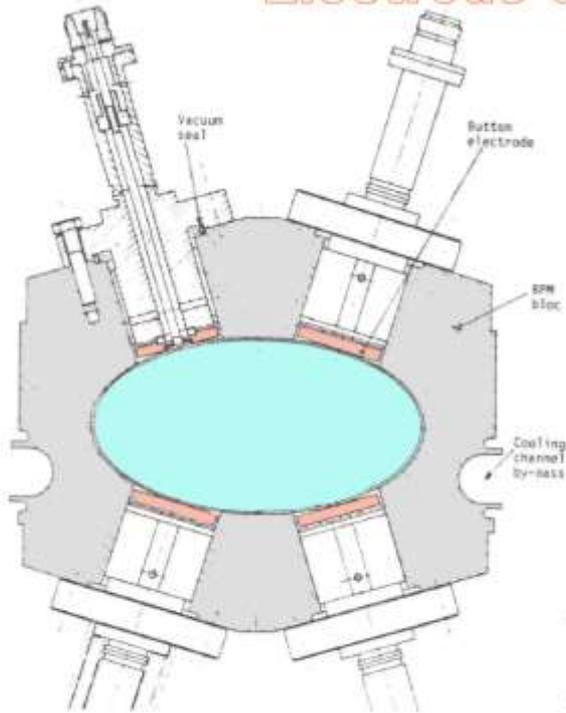
Figures 1a and 1b: principle of WCM



Ex: CTF2 (2002)

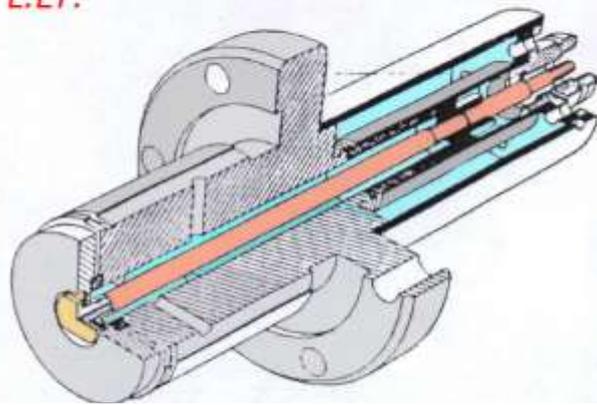
Impedance	4 Ω
Low-frequency cut-off, direct output	10 kHz
Low-frequency cut-off, integrator output	250 kHz
High-frequency cut-off	10 GHz
Number of feedthroughs	8
Gap length	2 mm
Beam aperture diameter	40 mm
Length	256 mm
Flange type	DN63CF
Max temperature for bake-out	150 °C

bouton



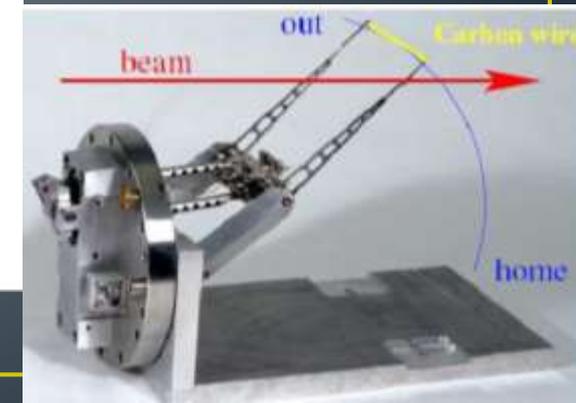
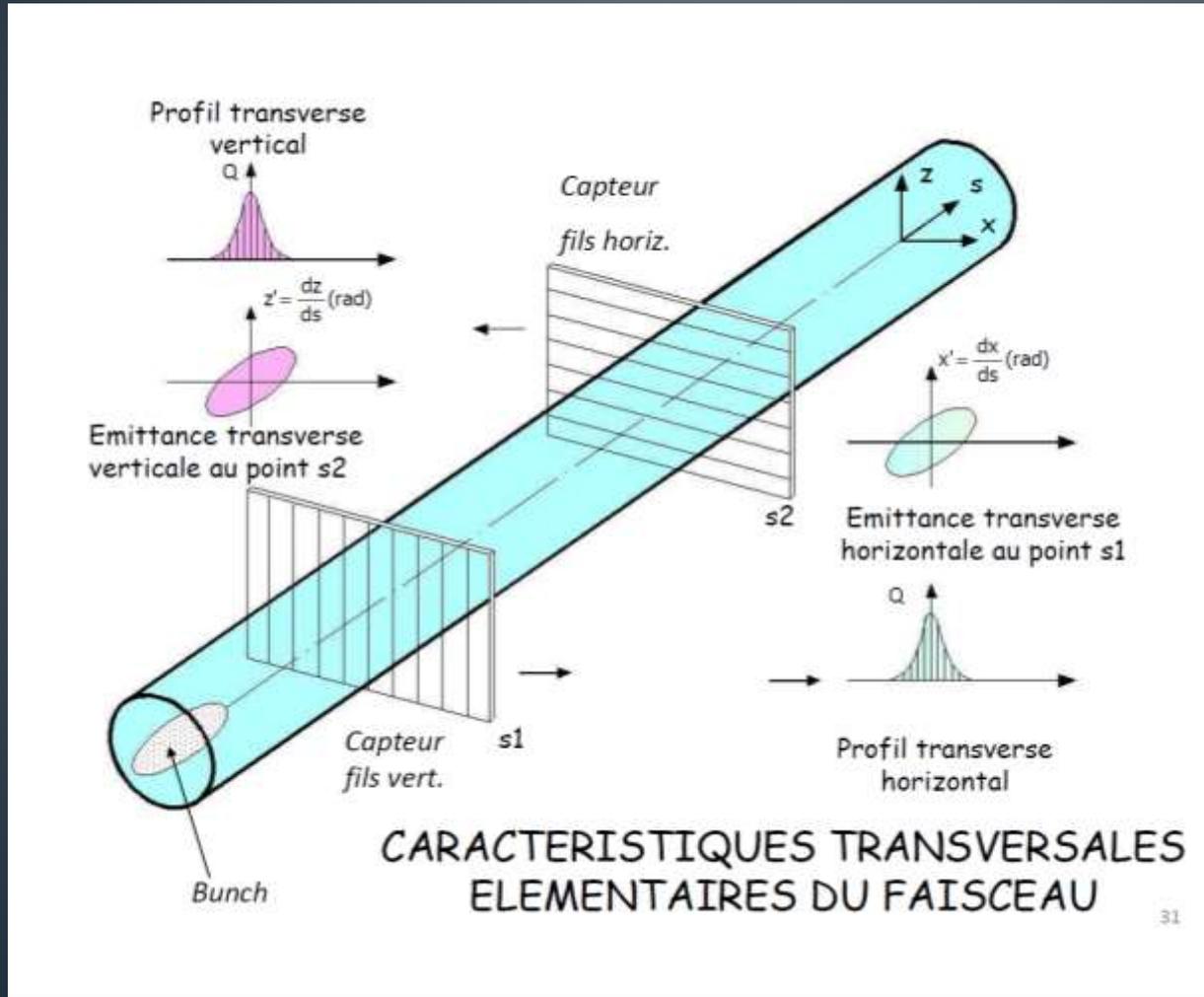
Bloc BPM typique pour machine

L.E.P.



- Non interceptif. Moniteur pouvant fonctionner pour toutes les natures de faisceau.
- Utilise le champ électrique associé au faisceau.
- Destinée généralement aux machines à électrons et aux machines à rayonnement synchrotron (longueur du bunch \sim longueur de l'électrode)
- Contrôle de l'orbite fermée du faisceau, asservissement de position du faisceau
- Réponse non linéaire : nécessite un étalonnage.

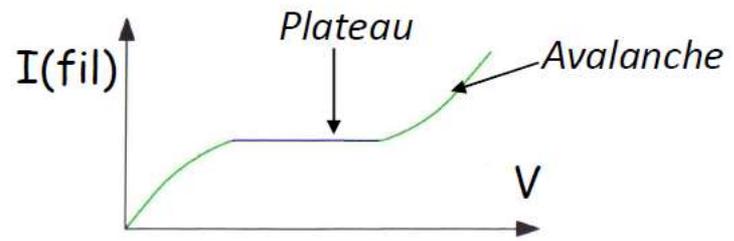
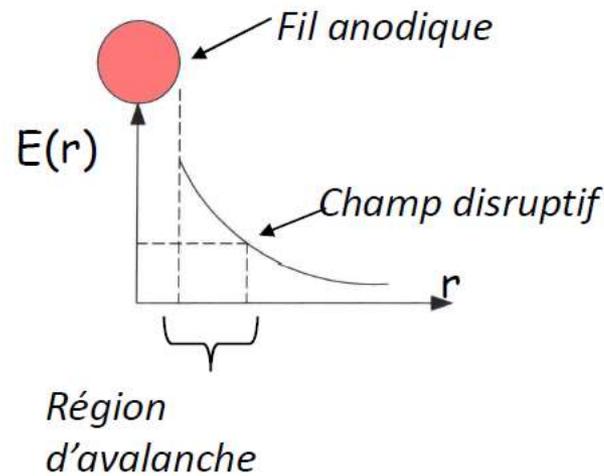
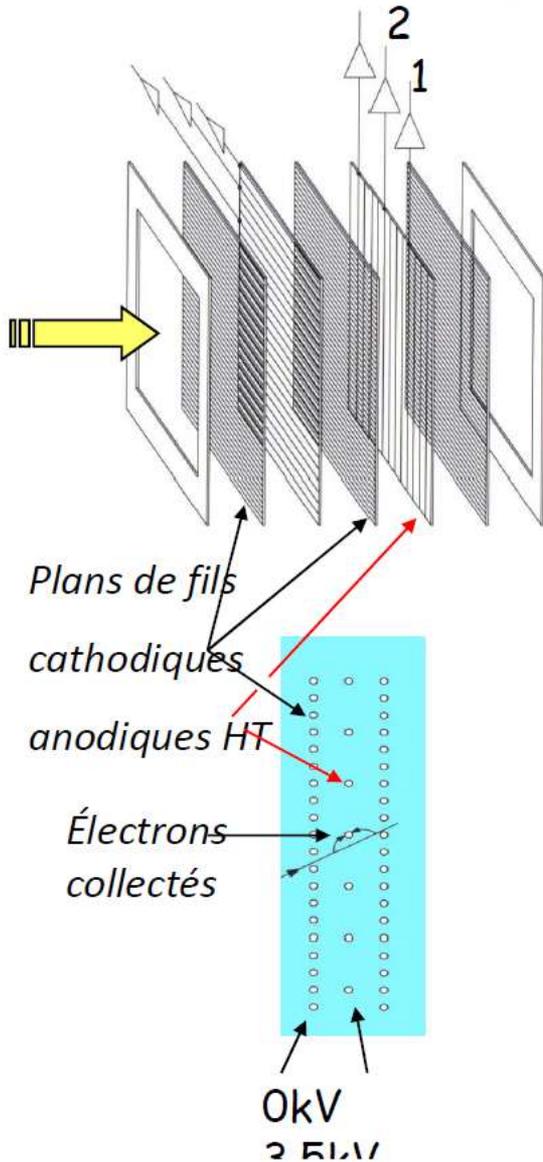
Fils mobiles: wire scanners



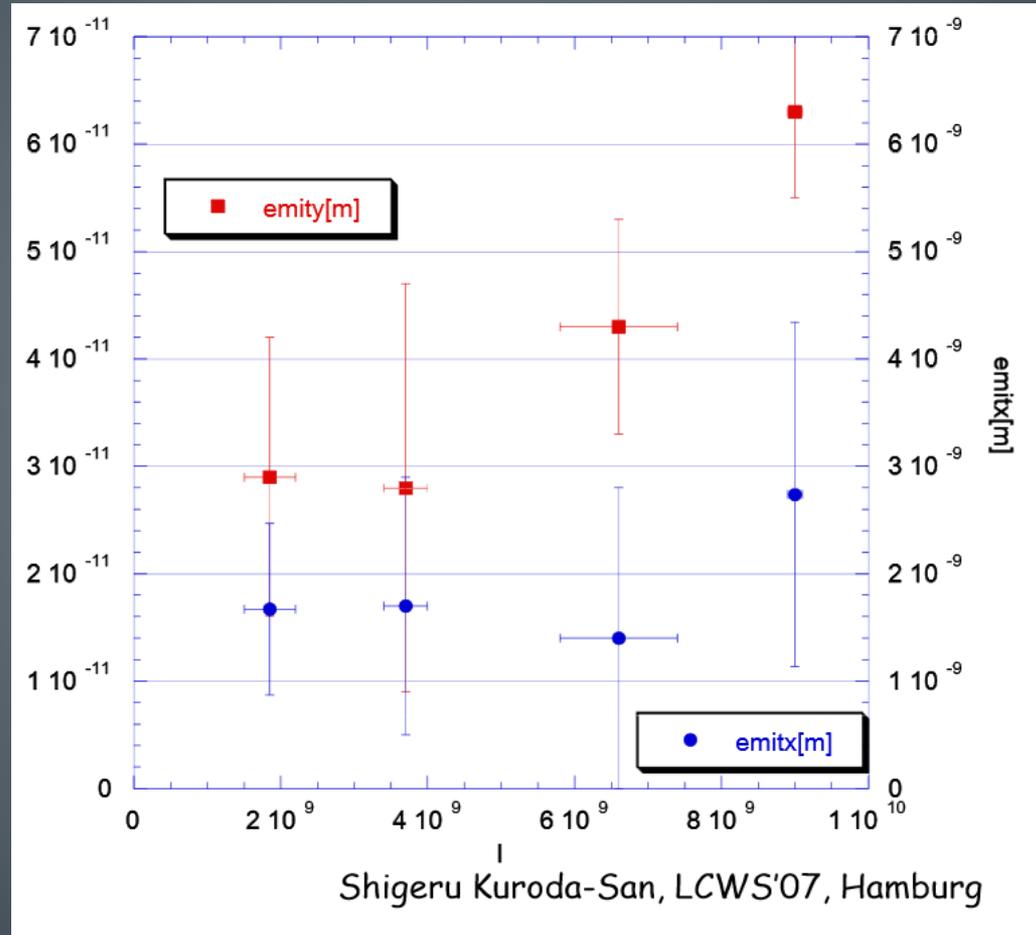
Profils transverses

Détecteurs destructifs

chambre à ionisation



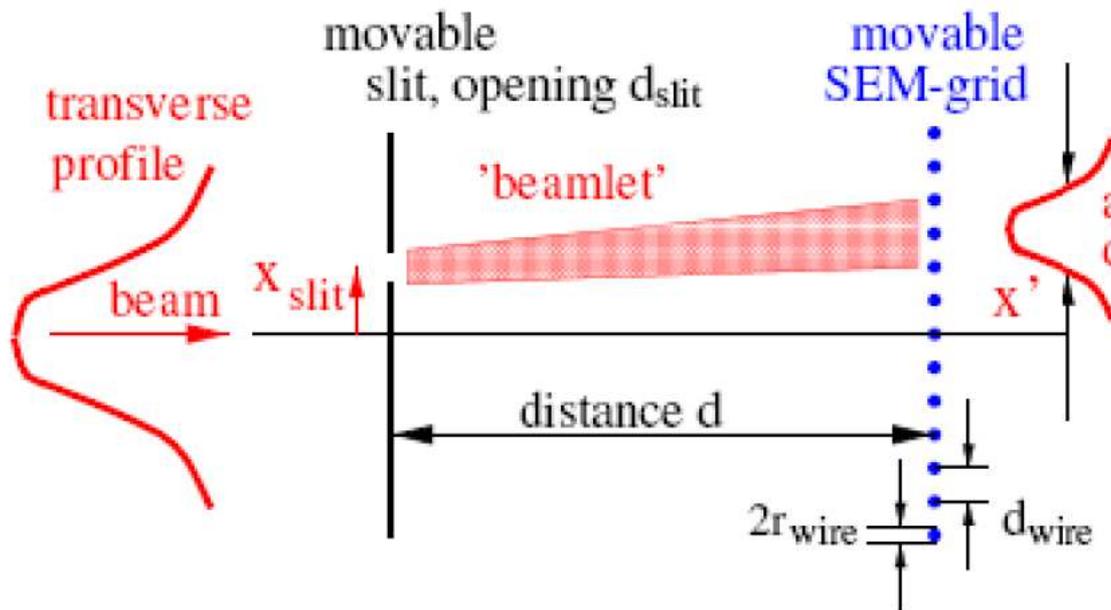
ATF2: 4 plans de fils



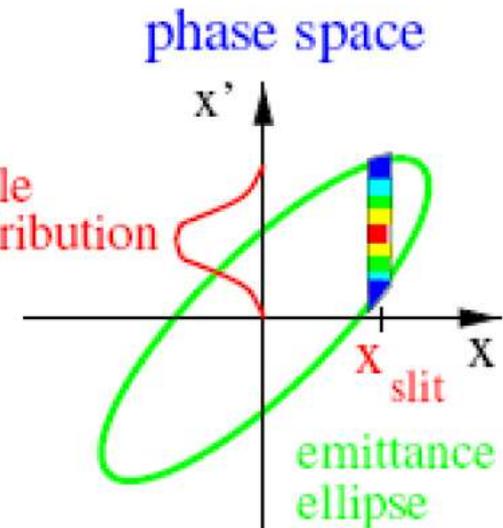
La Mesure de l'émittance transverse

EMITTANCEMETRE DE TYPE "fente - profileur"

Hardware

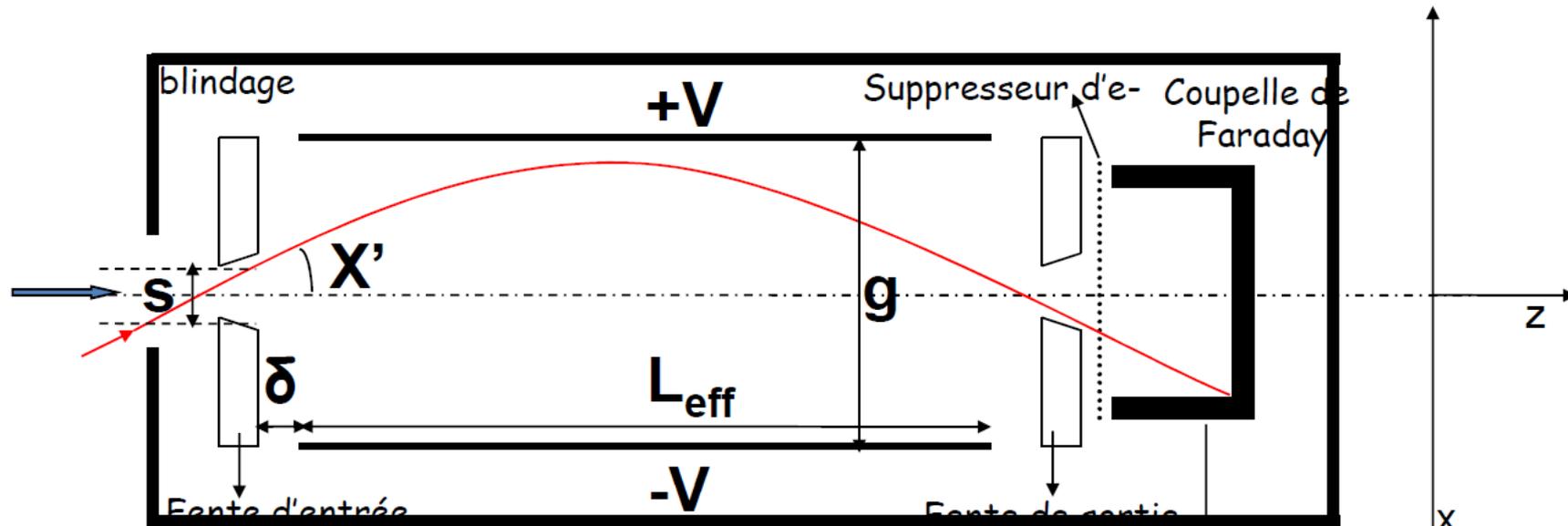


Analysis



La Mesure de l'émittance transverse

EMITTANCEMETRE DE TYPE SCANNER

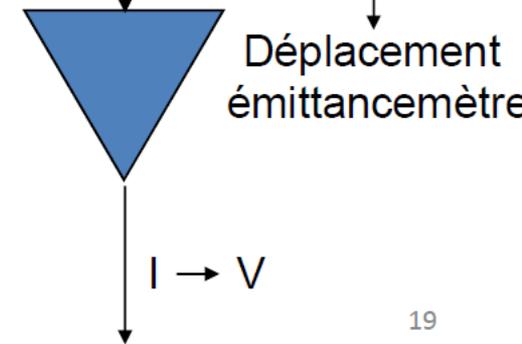


-Tension V nécessaire pour qu'un ion (charge q) d'énergie $q.U$ entrant avec un angle x' passe par la fente de sortie:

$$V = 2.U. x'.(g / L_{eff})$$

-Tension V_m nécessaire pour l'angle maximum x'_m analysable:

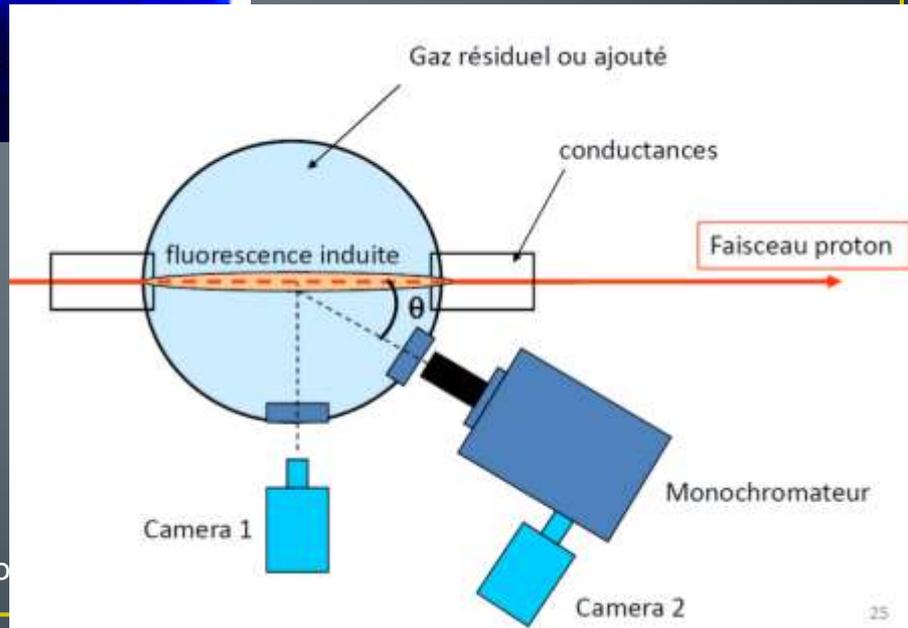
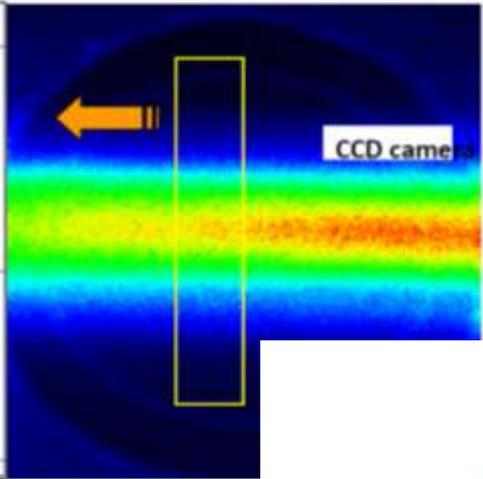
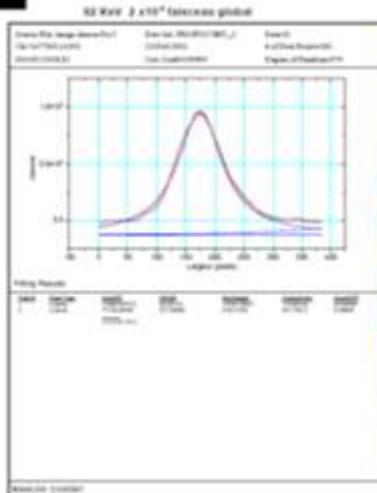
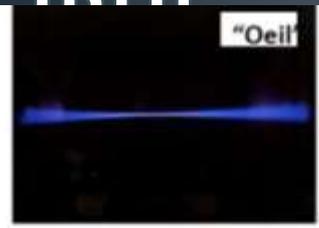
$$V_m = (8.g^2.U) / (D^2 - 4. \delta^2) \text{ pour } X'_m = (2.g) / (D + 2.\delta)$$



Fluorescence

par fluorescence

Interaction: faisceau proton / gaz résiduel
(Hydrogène: $2 \cdot 10^{-3}$ Pa)



Merci!!!

Matériel supplémentaire

Accélérateurs pour le médical et le biomédical

Quelques chiffres pour le cancer

- Le cancer touche environ 30% de la population des pays développés
- **355 000 nouveaux cas de cancers** en France en 2012
- 200 000 hommes et 155 000 femmes
- **148 000 décès** (85 000 hommes et 63 000 femmes)

- Chez **l'homme** : poumon/colon/prostate
- Chez la **femme** : sein/colon/poumon)

- Traitements: chirurgie, chimiothérapie, radiothérapie (souvent associés)
- Besoin d'un très grand nombre de moyens adaptés aux **types** et **localisations** de tumeurs
- Pour la radiothérapie: électrons, X ou gamma, protons, ions légers, carbone **etc**
- 45% de guérisons (50% chirurgie, 20% chirurgie + radiothérapie, 20% radiothérapie exclusive, 10% chimiothérapie)

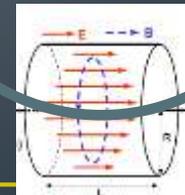
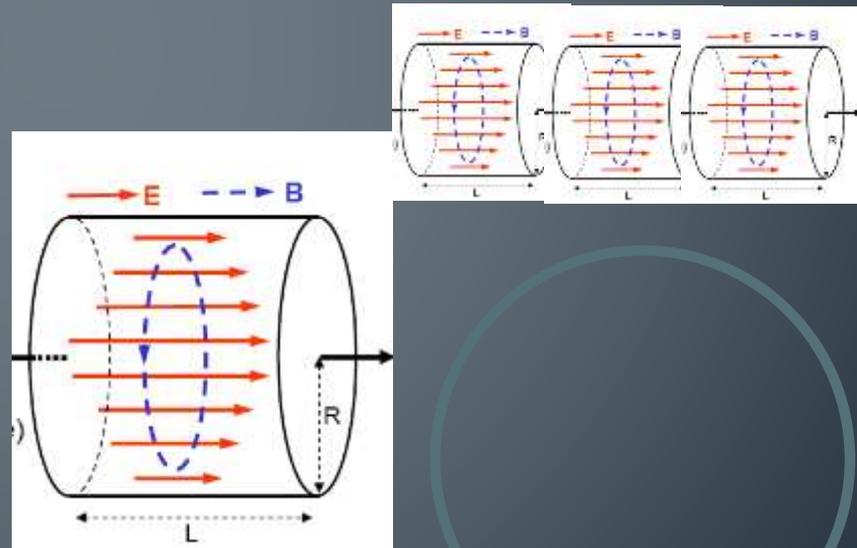
Des machines selon les besoins

- **Electrons/X ~ 20 MeV: accélérateur linéaire**
- **Protons de 200 MeV: cyclotron**
- **Protons ou ions jusqu'à 400 MeV/uma: synchrotron ou cyclotron supraconducteur**

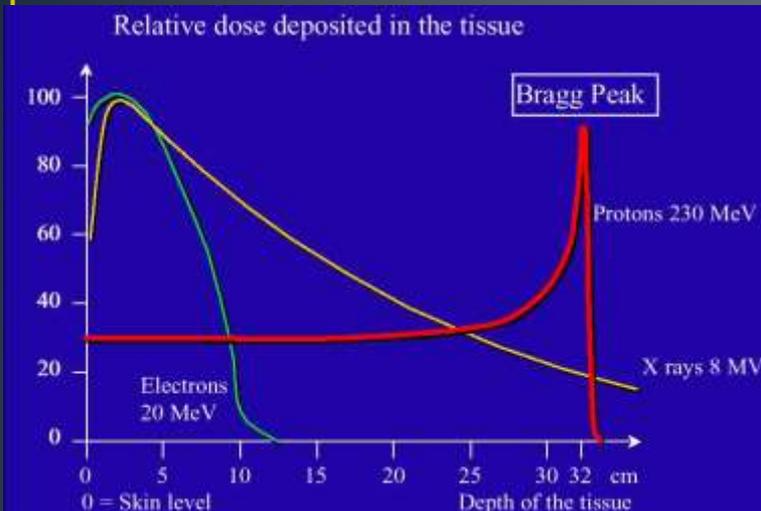
Machines non-électrostatiques car les tensions sont au delà du réalisable (champ statique non confinable)

Utilisation d'une onde HF confinable dans cavite

Les faisceaux ont une structure en temps (qqes MHz à qqes GHz)



Le dépôt de dose dans les tissus



Electrons/X ou gamma

- Dépôt en entrée
- Différentes incidences pour irradier les tumeurs internes

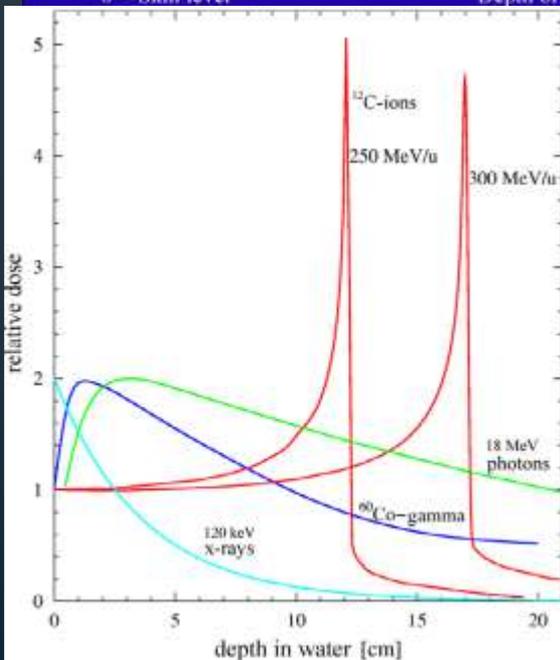
Hadrons

- Pic de Bragg (plus élevé pour le carbone¹)
- Dépôt plus localisé
- Fragmentation et irradiation avale (sauf p)

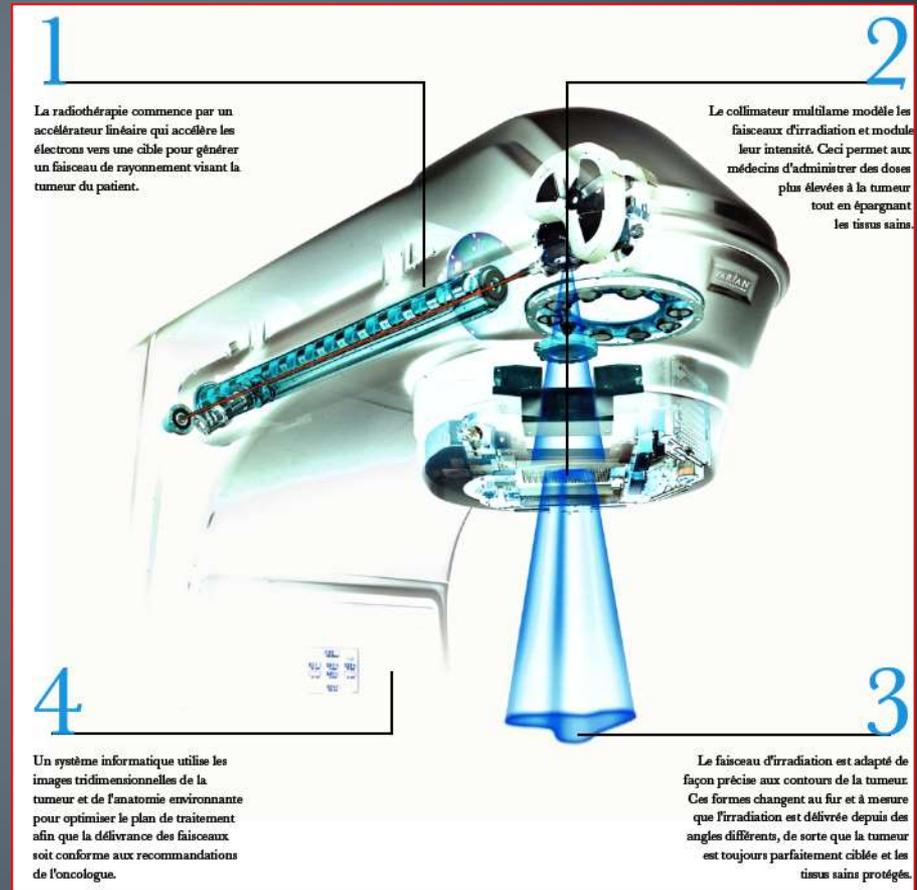
¹Attention: ce qui compte est **l'efficacité biologique**

Les effets sont **non-linéaires avec la dose**:
nécessité d'un contrôle de dose précis

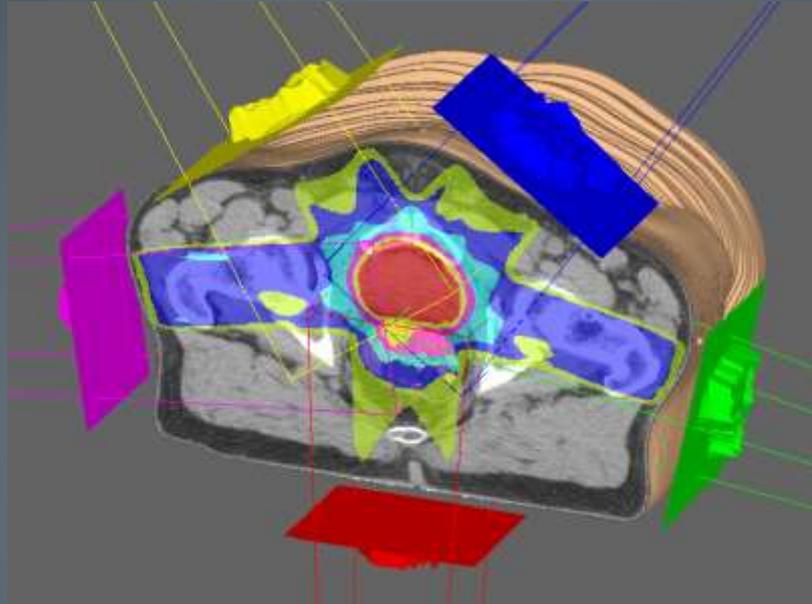
$$RBE = \frac{D_X}{D_{part}} \Bigg]_{\text{effet egal}} \quad (\sim 2\%)$$



L'accélérateur linéaire à électrons



Irradiation à incidence variable



La hadronthérapie dans le monde

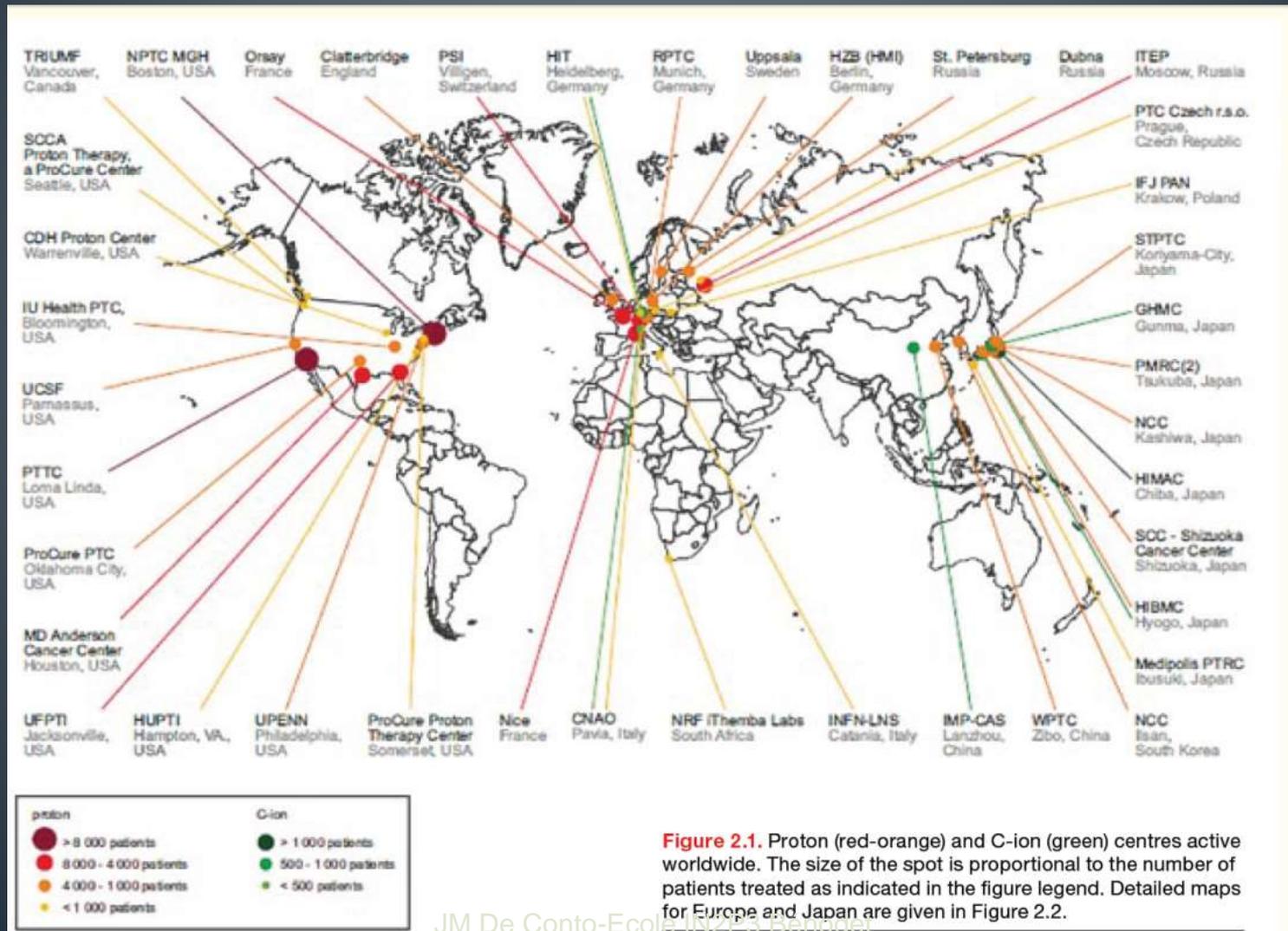
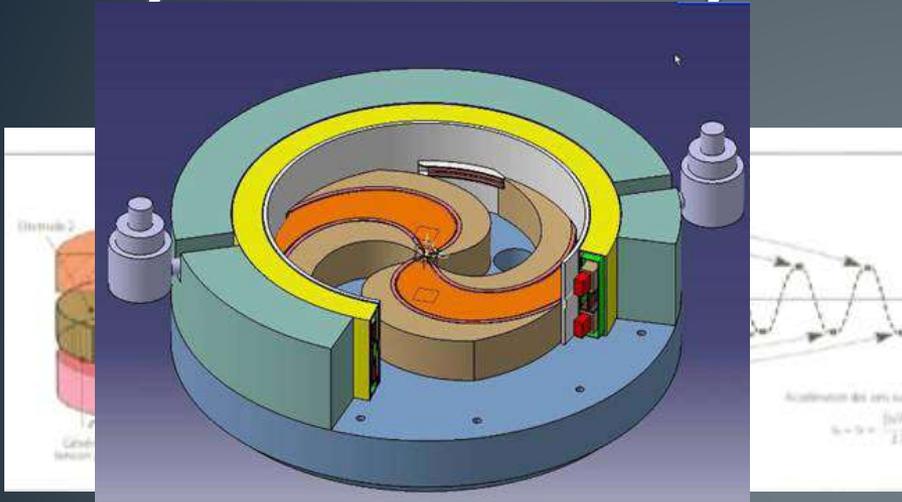


Figure 2.1. Proton (red-orange) and C-ion (green) centres active worldwide. The size of the spot is proportional to the number of patients treated as indicated in the figure legend. Detailed maps for Europe and Japan are given in Figure 2.2.

Centres de traitement

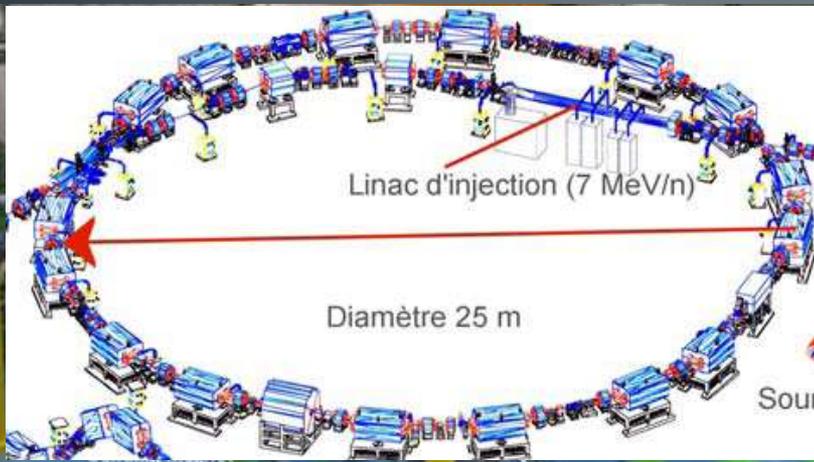
- 50 centres de traitement par faisceau de protons dans le monde
106000 patients traités depuis les années 1990
- 2 centres en France :
Centre de Protonthérapie d'Orsay et Centre Antoine Lacassagne Nice
- 8 centres de traitement par ions carbone
4 au Japon, 2 en Chine, 1 en Allemagne et 1 en Italie
13000 patients traités depuis les années 2000
deux autres centres allemands avaient été prévus
un centre en construction à Vienne (MedAustron)
- En France
 - ETOILE (LYON) abandonné (démarré en 2000)
 - ARCHADE (Advanced Resource Centre for HADrontherapy in Europe)
 - Une machine de traitement protons+une de R&D carbone

Cyclotron et synchrotron



Cyclotron

- Compact et économique
- Flexible en intensité
- Limité en énergie
- Machine à énergie fixe
- Besoin d'un dégradeur pour positionner le pic de Bragg

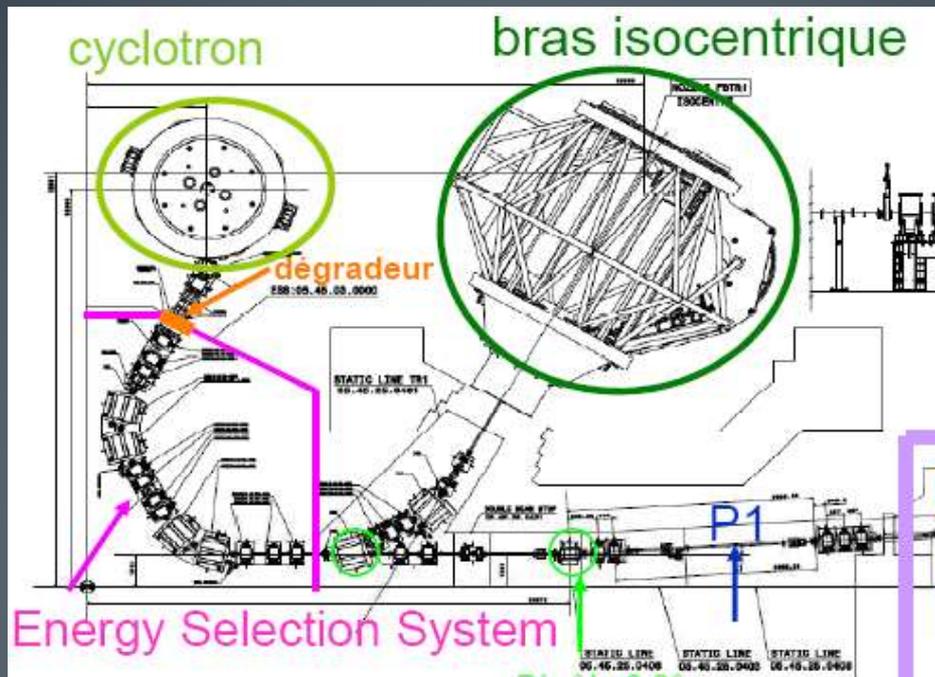


Synchrotron

- Non limité en énergie
- Flexibilité absolue en courant et énergie (1 s)
- Irradiation active (cf après)
- Moins économique

Carbone 430 MeV/uma → diamètre 25 m

Cyclotron: Centre de Protonthérapie d'Orsay



$E_{max} = 235 \text{ MeV}$

$I_{max} = 500 \text{ nA}$

220 tonnes

4 secteurs – 2 cavités RF à 106.157 MHz

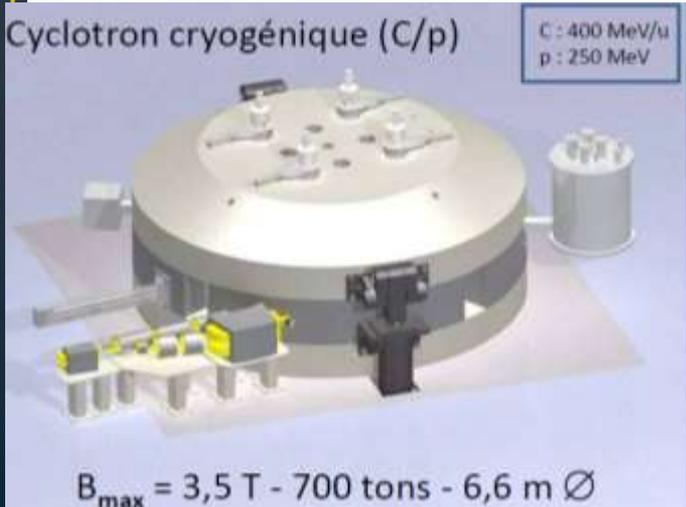
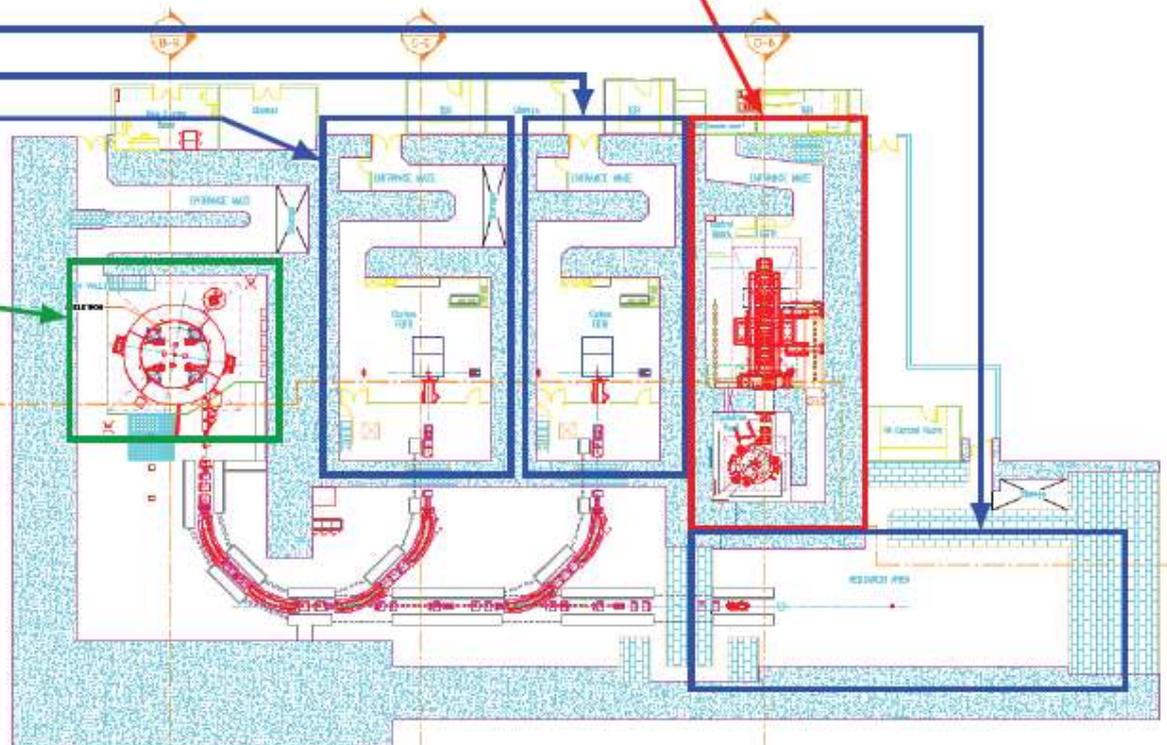
champ moyen à l'extraction 2.188 T

Projet ARCHADE



- Hadrontherapy center :
 - ▶ Protontherapy treatments
 - Proteus One (S2C2)
 - Protons at 250 MeV
 - ▶ Research in carbon-therapy
 - Physics
 - Biology
 - Clinical testing

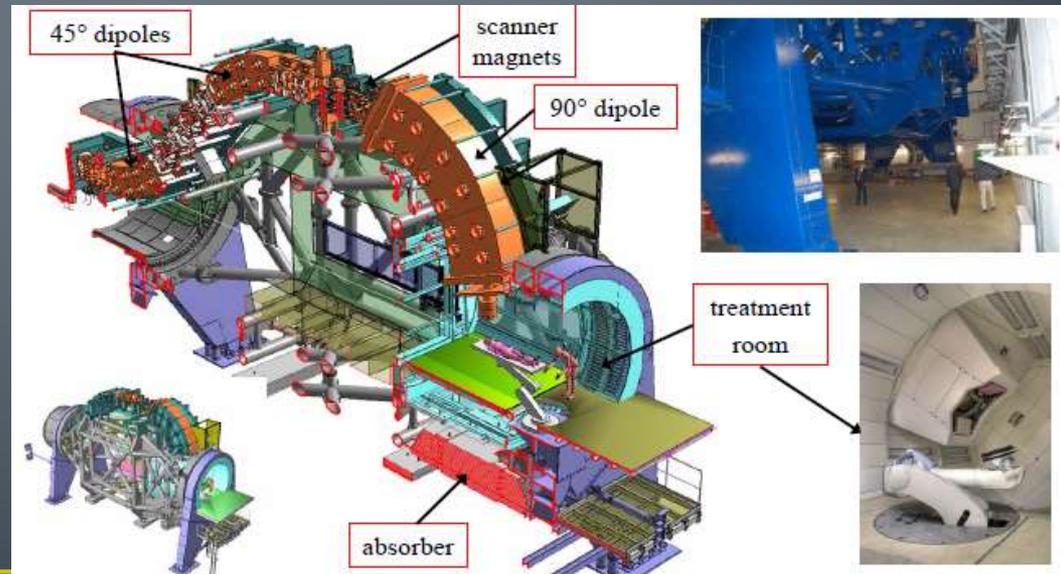
- Supraconducting Cyclotron C400
 - ^{12}C at 400 MeV/u
 - Protons at 250 MeV
 - All light nuclei with $A/Z=2$



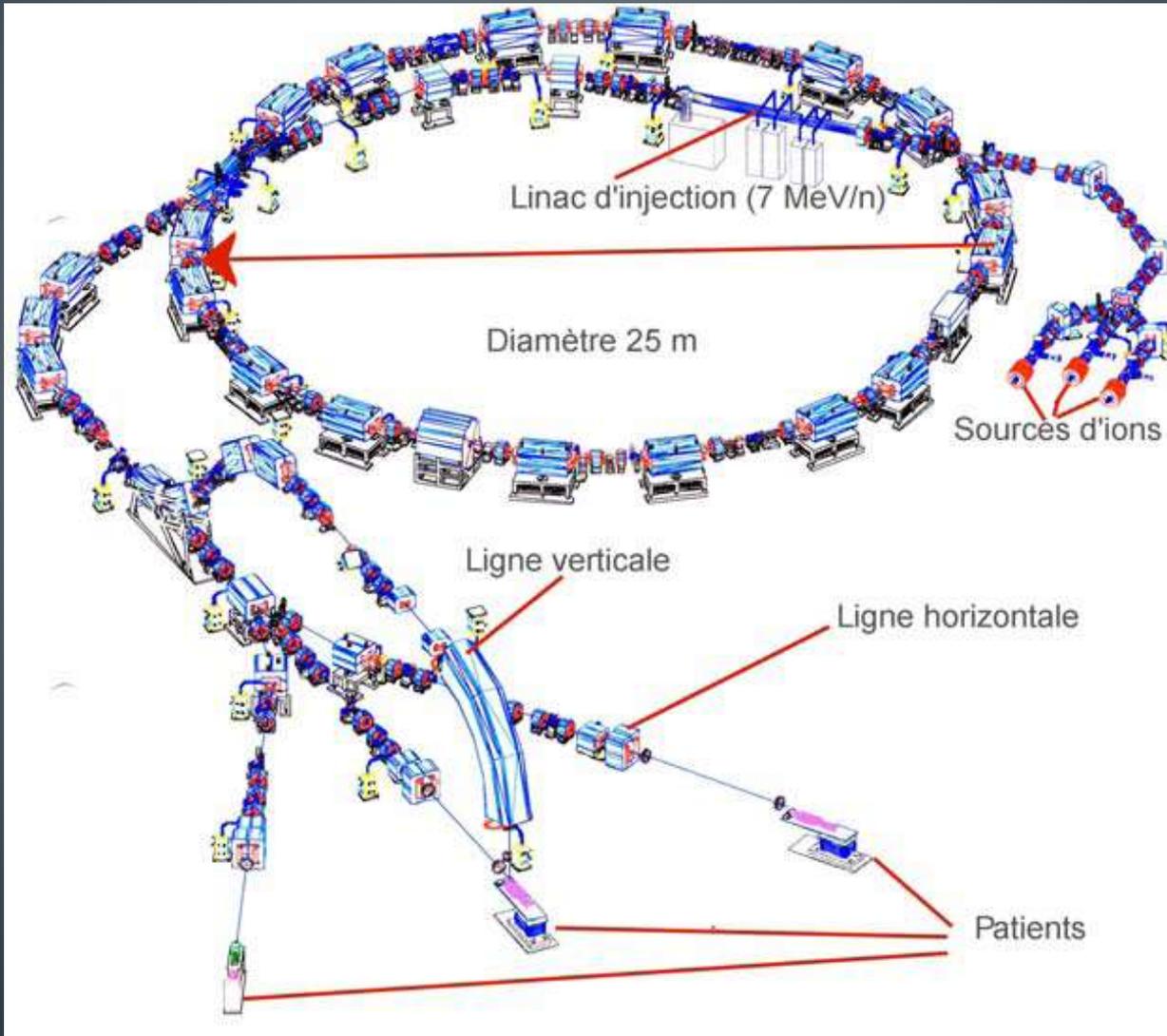
HIT Heidelberg (en opération)



Diamètre synchrotron 25m
GANTRY: 22mx13m 450t



CNAO (Pavie). En opération



Futuriste:
moments électriques dipolaires

Transparents: collaboration Jedi

Electric Dipoles

Classical definition:

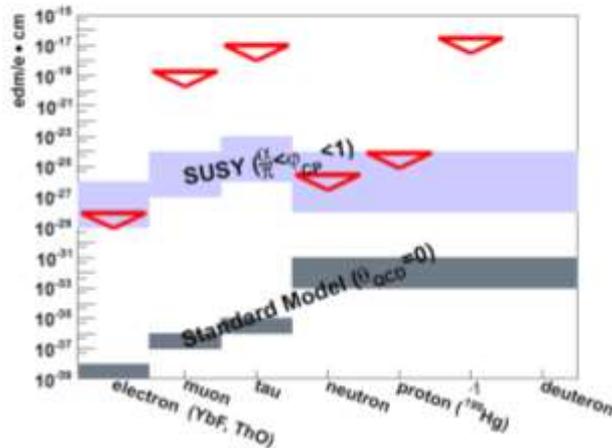
$$\vec{d} = \sum_i q_i \vec{r}_i$$



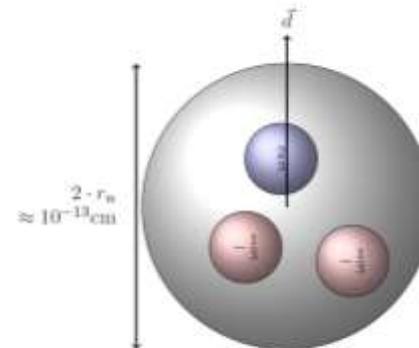
Order of magnitude

	atomic physics	hadron physics
charges	e	e
$ \vec{r}_1 - \vec{r}_2 $	$1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$	$1 \text{ fm} = 10^{-13} \text{ cm}$
EDM		
naive expectation	$10^{-8} e \cdot \text{cm}$	$10^{-13} e \cdot \text{cm}$
observed	water molecule $2 \cdot 10^{-8} e \cdot \text{cm}$	neutron $< 3 \cdot 10^{-26} e \cdot \text{cm}$

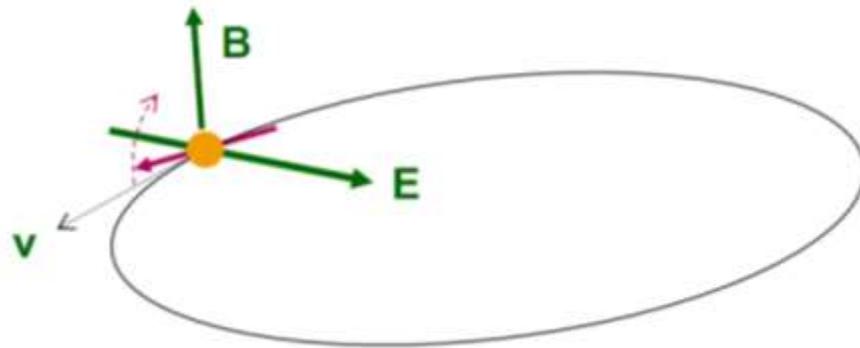
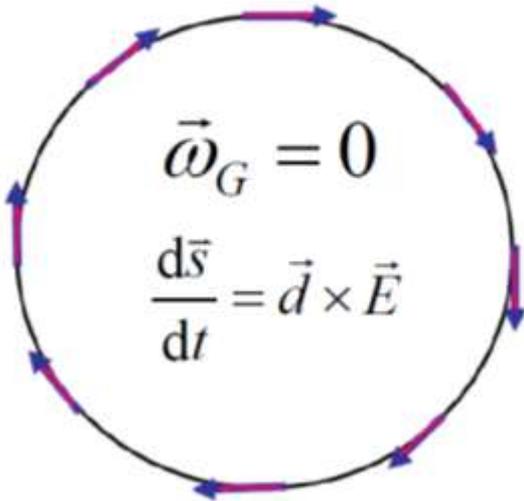
EDM: Current Upper Limits



Order of magnitude



neutron EDM of $d_n = 3 \cdot 10^{-26} e \cdot \text{cm}$ corresponds to separation of u - from d -quarks of $\approx 5 \cdot 10^{-26} \text{ cm}$



“Freeze” horizontal spin precession; watch for development of a vertical component !

A magic storage ring for protons (electrostatic), deuterons, and helium-3

particle	p (GeV/c)	E (MV/m)	B (T)
proton	0.701	16.789	0.000
deuteron	1.000	-3.983	0.160
³ He	1.285	17.158	-0.051

One machine with r ~ 30 m

Some numbers

- Very long Spin Coherence Time (SCT: 1000 seconds)
- High precision storage ring (field homogeneity, alignment, imperfections) filled with 4.10^{10} particles
- Small machine (~ 1 GeV)
- Example: beam position to be measured up to 2 nm is a challenge but remains realistic (20nm achievable)
- Very high electrostatic fields (> 10 MV/m)
- Polarized beams (80%) and polarimetry
- Systematic errors hunting.

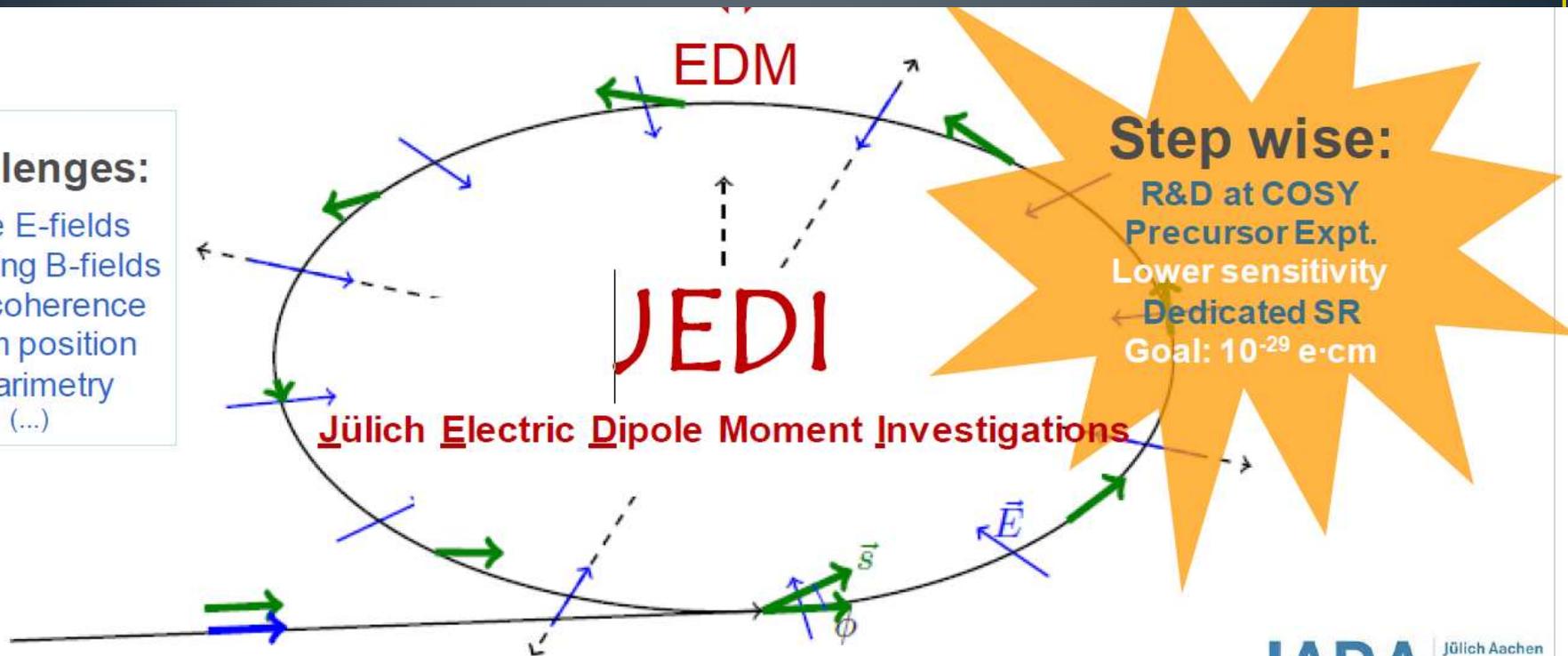
$$\sigma_{\text{stat}} \approx \frac{1}{\sqrt{Nf_{\tau}PAE}} \Rightarrow \sigma_{\text{stat}}(1\text{year}) = 10^{-29} \text{ e}\cdot\text{cm}$$

challenge: get σ_{sys} to the same level

JEDI

Challenges:

Huge E-fields
Shielding B-fields
Spin coherence
Beam position
Polarimetry
(...)



> 100 members

(Aachen, Bonn, Dubna, Ferrara, Cornell, Jülich, Krakow, Michigan, St. Petersburg, Minsk, Novosibirsk, Stockholm, Tbilisi, . . .)

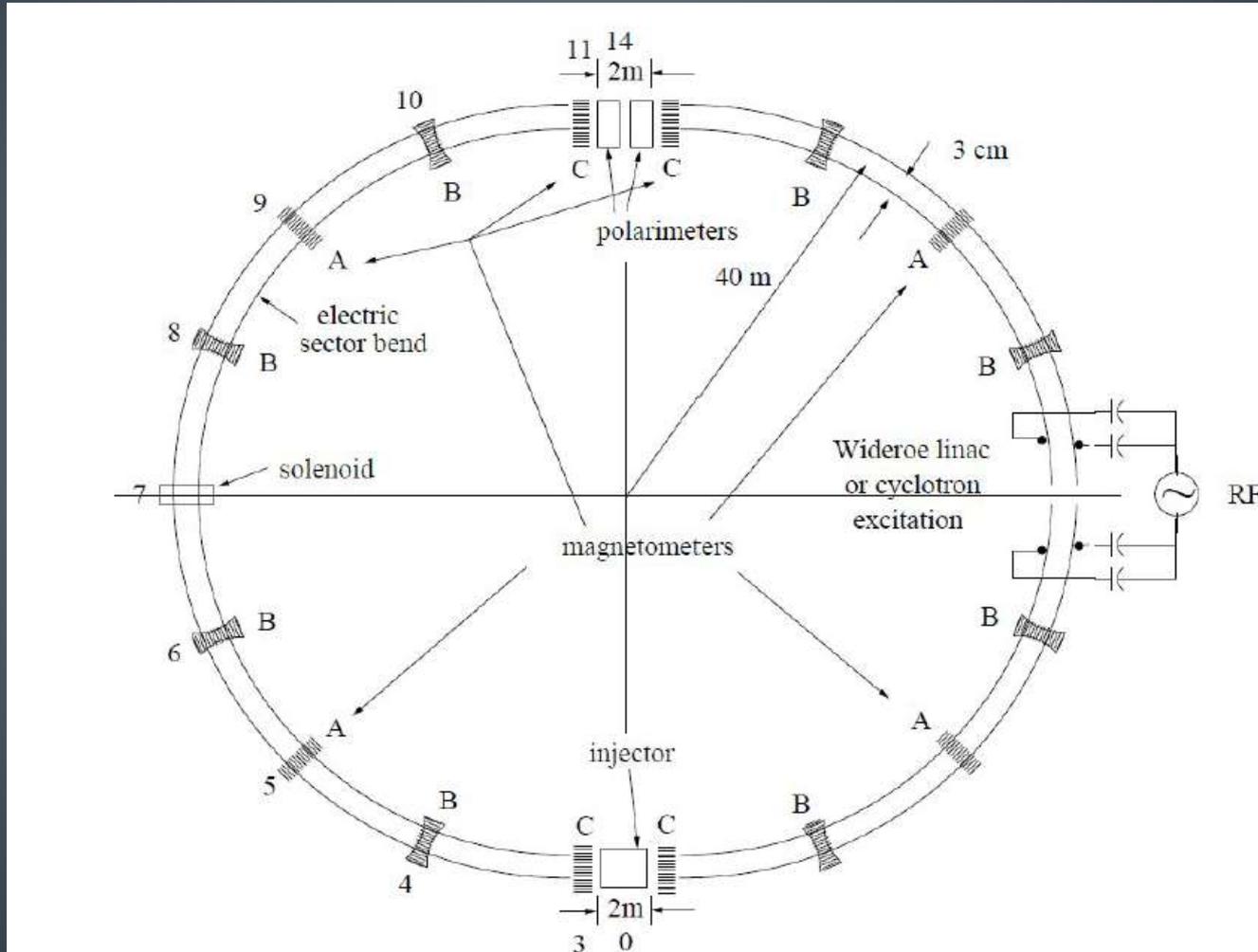
12 PhD students from JARA-FAME (Forces and Matter Experiments)

<http://collaborations.fz-juelich.de/ikp/jedi/>

JARA Jülich Aachen
Research
Alliance

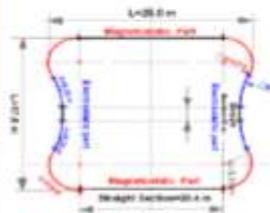
- Fundamental studies of electrostatic or electro/magnetostatic storage rings
- Experimental studies and validation of concepts on COSY machine

Compensation des erreurs systématiques: anneaux contrarotatifs



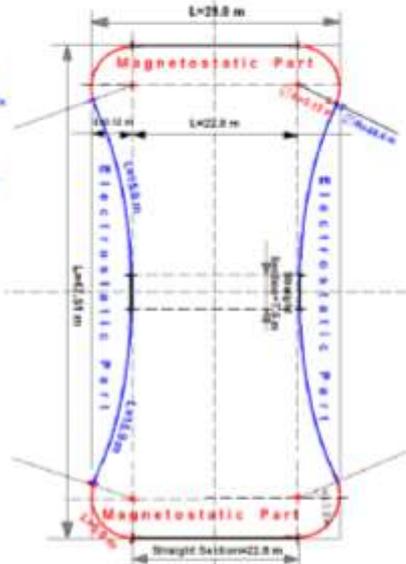
d-EDM ring for different energies

dEDM-75 MeV



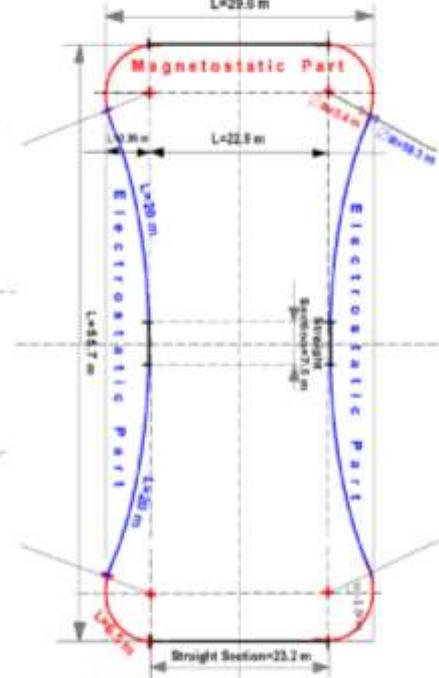
26 m x 17 m

dEDM-200 MeV



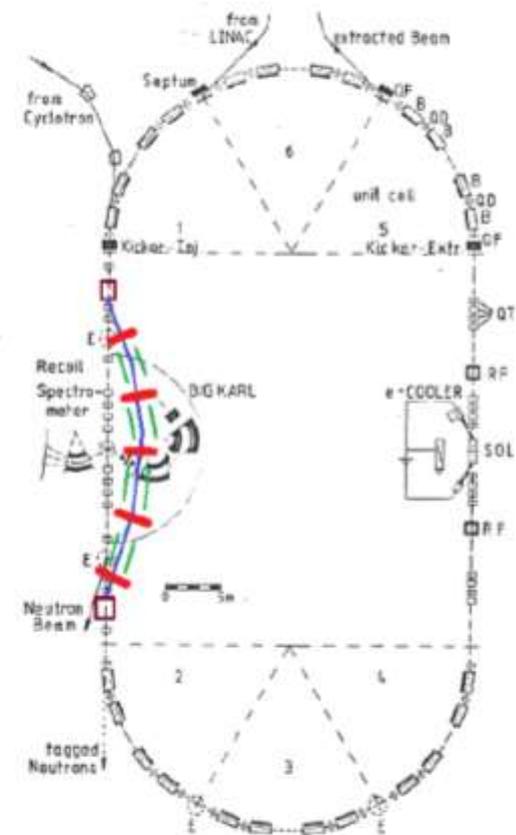
29 m x 47 m

dEDM-270 MeV



29.6 m x 55.7 m

COSY

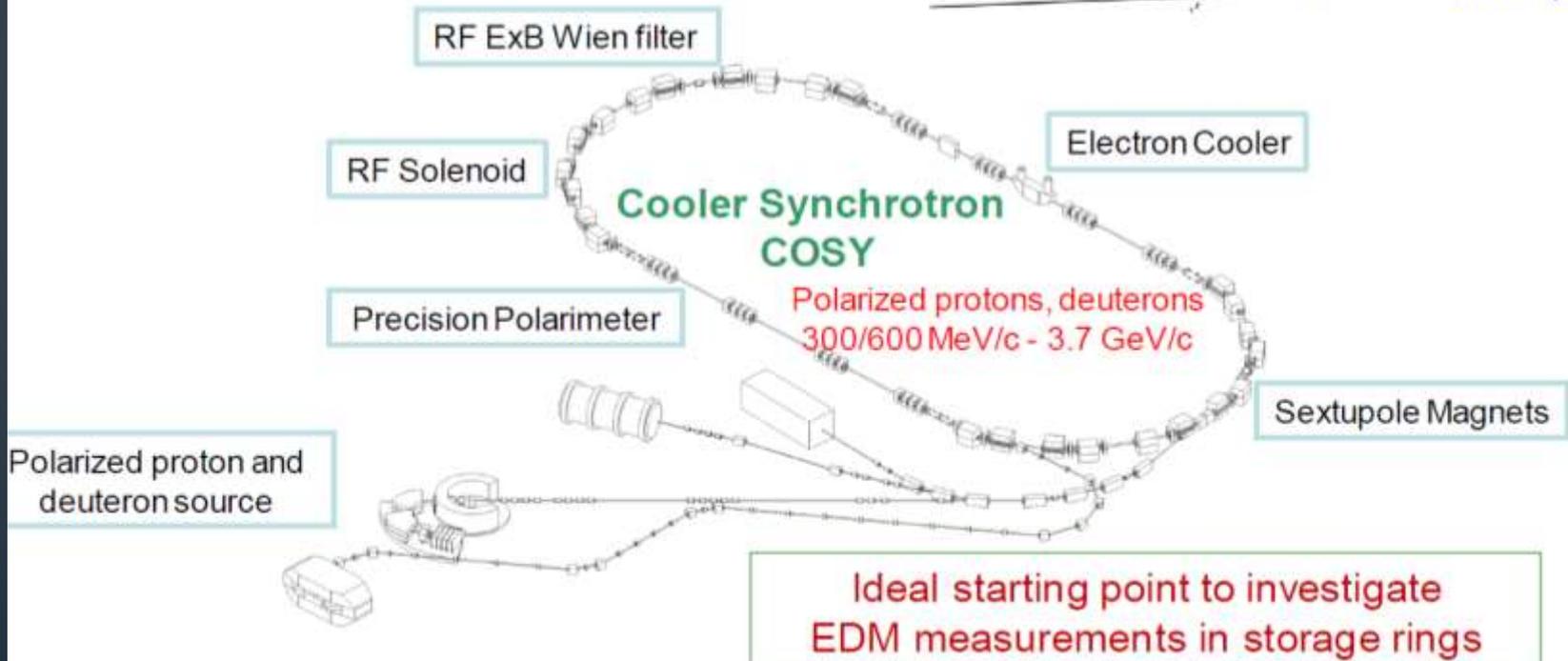
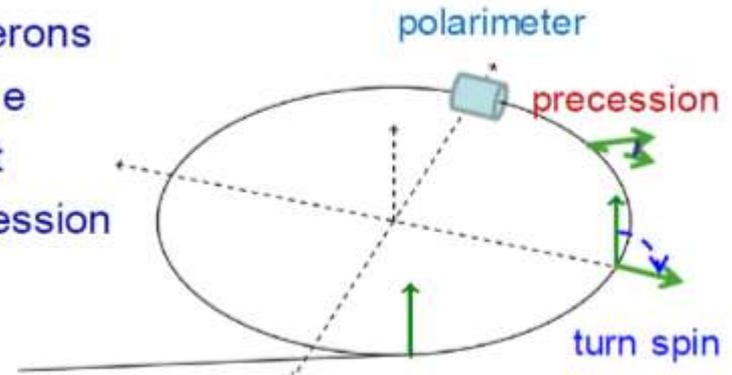


34 m x 71 m

Experimental Setup at COSY

- Inject and accelerate vertically polarized deuterons
- Spin rotated with RF fields into horizontal plane
- Move beam slowly (in 100 s) on internal target
- Measure asymmetry and determine spin precession

At 970 MeV/c deuterons: $\gamma G \cdot f_{rev} \approx 120$ kHz



**Merci de votre
attention**